

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з дисципліни

**“ РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ТА АВТОМАТИКА”**

(для студентів 4 курсу денної і 4, 5 курсів заочної форм навчання з спеціальностей 6.090603 - “Електротехнічні системи електроспоживання” і 6.050701- «Електротехніка та електротехнології»)

**ХАРКІВ – ХНАМГ – 2008**

Конспект лекцій з дисципліни “Релейний захист та автоматика” (для студентів 4 курсу денної та 4, 5 курсів заочної форм навчання з спеціальності 6.090603 – “Електротехнічні системи електроспоживання” і 6.050701 – «Електротехніка та електротехнології») / Укл. Ковальов В.М. - Харків: ХНАМГ, – 2008. – 108 с.

Укладач: В.М. Ковальов

Рецензент: доцент В.М. Фатєєв

Рекомендовано кафедрою електропостачання міст, протокол №7 від 26.12.2007

# ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП.....	5
1. ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ ДЛЯ РЕЛЕЙНИХ ЗАХИСТІВ.....	7
1.1. Трансформатори струму.....	7
1.2. Електромагніти реле струму.....	11
1.3. Індукційне реле струму РТ-80.....	14
1.4. Електромагнітні реле часу.....	16
1.5. Електромагнітні проміжні й сигнальні реле.....	18
1.6. Реле зі внутрішніми трансформаторами струму.....	21
2. СТРУМОВИЙ ЗАХИСТ.....	24
2.1. Схеми включення струмових реле та трансформаторів струму.....	24
2.2. Ступеневий принцип побудови струмових захистів.....	27
2.3. Джерела оперативного струму.....	28
2.4. Схемотехніка струмових захистів.....	29
2.5. Захист запобіжниками і автоматичними вимикачами.....	35
3. СТРУМОВИЙ ЗАХИСТ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ.....	39
3.1. Теоретичні основи побудови захистів.....	39
3.2. Захист зворотної послідовності.....	42
3.3. Захист нульової послідовності.....	45
4. СТРУМОВИЙ СПРЯМОВАНИЙ ЗАХИСТ.....	47
4.1. Принцип побудови захисту.....	47
4.2. Реле напрямку потужності.....	48
5. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	49
5.1. Електромагнітні процеси в трансформаторах.....	49

5.2. Розрахунок струмових режимів трансформаторів.....	52
5.3. Вибір типів захистів трансформатора.....	57
6. ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	57
6.1. Принцип дії диференціального захисту.....	58
6.2. Диференціальний захист на основі реле РНТ-565.....	60
6.3. Диференціальний захист на основі реле ДЗТ-11.....	64
7. МАКСИМАЛЬНИЙ СТРУМОВИЙ ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ	67
8. ГАЗОВИЙ ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	70
9. РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ЛІНІЙ 6-35 кВ.....	74
9.1. Загальні відомості про лінії.....	74
9.2. Розрахунок струмових режимів ліній.....	76
9.3. Вибір типів захистів ліній.....	80
9.4. Захист нульової послідовності ліній.....	81
9.5. Захист одиночних ліній.....	84
9.6. Захист паралельних ліній.....	88
9.7. Захист послідовних ліній.....	91
9.8. Захист ліній за мінімальною напругою.....	93
10. ЗАХИСТ ЛІНІЙ 110-330 кВ.....	94
10.1. Вибір типів захистів ліній.....	94
10.2. Захист нульової послідовності.....	95
10.3. Дистанційний захист ліній.....	96
10.4. Диференційно-фазний захист ліній.....	99
11. РЕЛЕЙНА АВТОМАТИКА.....	101
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	107

## ВСТУП

Мета вивчення предмета «Релейний захист та автоматика» (РЗА) - одержати загальні теоретичні знання і практичні навички для експлуатації й проектування систем РЗА. Для цього необхідно:

- 1) вивчити й знати назви типів РЗА, їхнє призначення та область застосування;
- 2) вивчити й розуміти принципи дії спеціальних електричних апаратів для РЗА й принципи побудови електричних схем РЗА;
- 3) навчитися й уміти проектувати конкретні системи РЗА з наступним їхнім налаштуванням.

РЗА - це комплекс електричних апаратів, включених в електричну схему, що створює сигнали:

- 1) на відключення ушкоджених елементів від мережі та на сигналізацію для персоналу;
- 2) на підключення споживачів до резервних джерел, або на їхнє відключення при дефіциті потужності.

Класифікація релейних захистів здійснюється за їх принципом дії (рис. В.1). Струмові захисти працюють за принципом виміру струму, з яких струмова відсічка спрацьовує без витримки часу, а максимальний струмовий захист спрацьовує завжди з витримкою часу. Комбіновані струмові захисти працюють за принципом виміру струму та іншого додаткового параметра, що характеризує аварійний режим. Диференціальні струмові захисти працюють за принципом виміру різниці струмів до та після елемента мережі. Спеціальні захисти працюють за принципом виміру параметрів, не пов'язаних зі струмом.

Класифікація пристроїв релейної автоматики здійснюється за їх призначенням (рис. В.2).

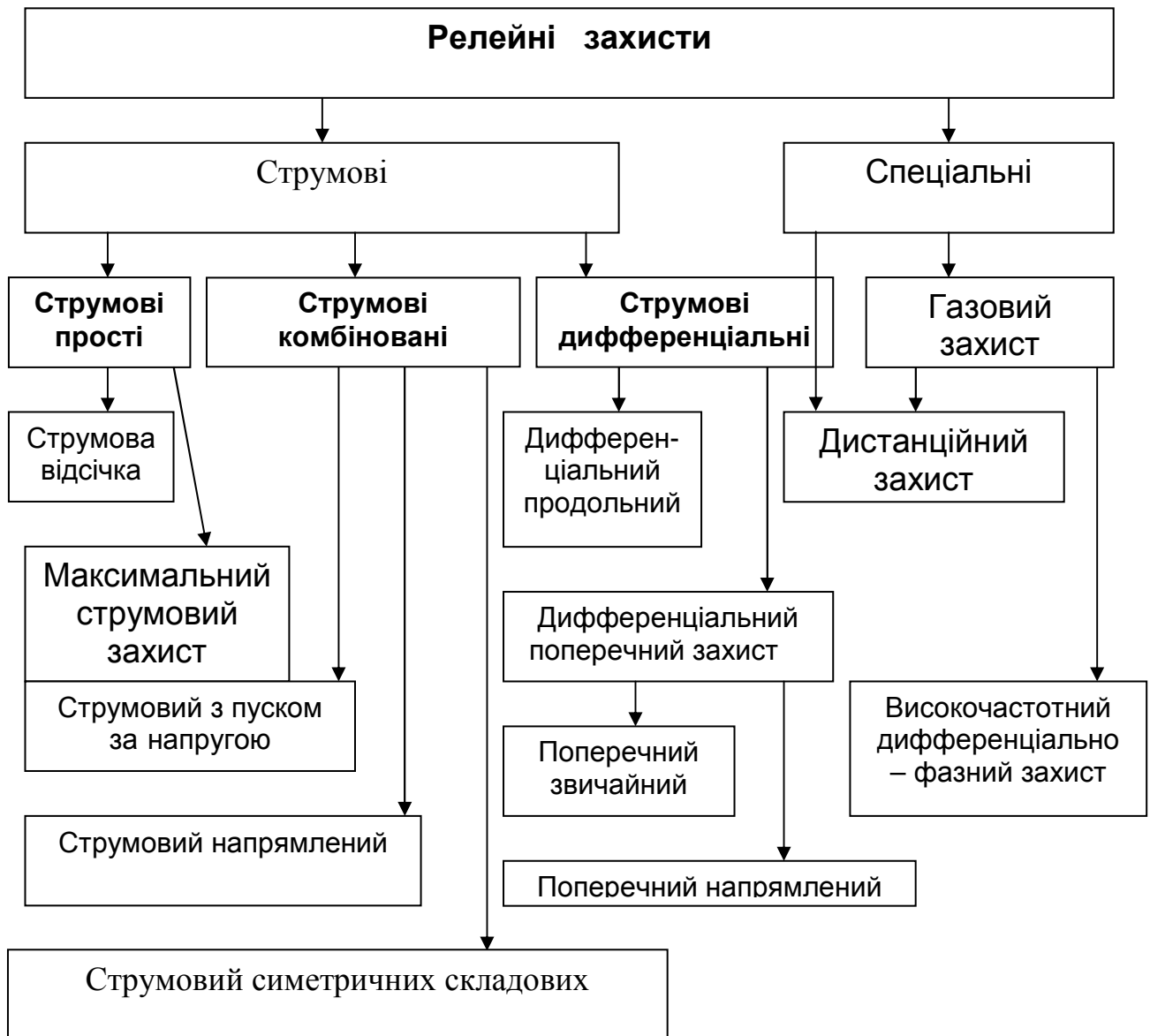
У релейній автоматичі використовуються наступні скорочення:

АПВ - автоматичне повторне включення під напругу ліній або трансформаторів після неручного їхнього відключення;

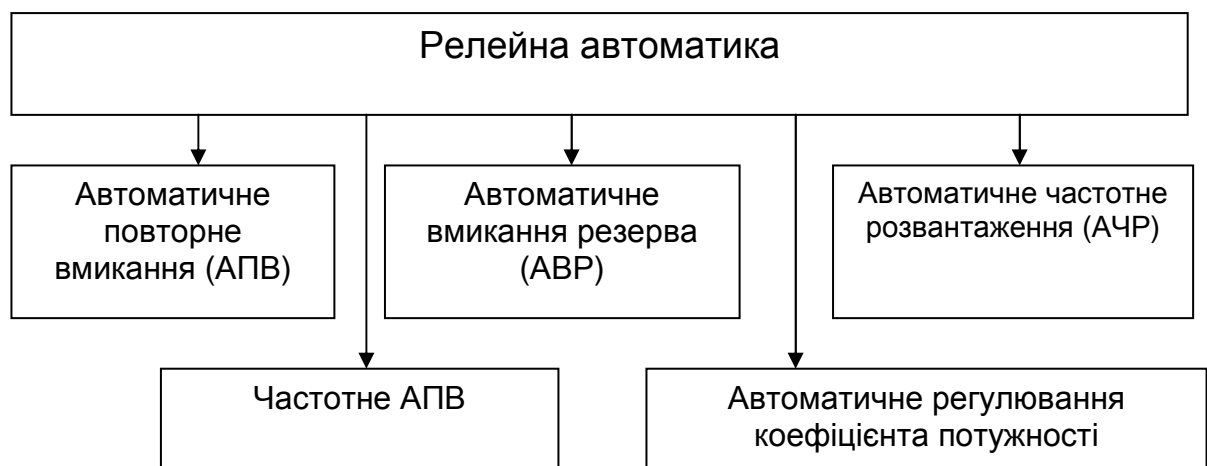
АВР - автоматичне включення резерву, тобто після зникнення напруги споживачі автоматично підключаються до іншого джерела;

АЧР - автоматичне частотне розвантаження, тобто відключення споживачів 3-й категорії при зниженні частоти напруги;

ЧАПВ - частотне автоматичне повторне включення після підвищення частоти до норми.



**Рис. В. 1 – Класифікація релейних захистів за принципом дії**



**Рис. В. 2 -Класифікація релейної автоматики за призначенням**

# 1. ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ ДЛЯ РЕЛЕЙНИХ ЗАХИСТІВ

## 1.1. Трансформатори струму

Трансформатори струму (ТС) призначені:

- для зменшення великих значень струмів до величин допустимих для роботи схем релейного захисту;
- для електричного відділення схем релейного захисту від силових кіл високої напруги.

ТС мають стандартний номінальний вторинний струм  $I_{ном} = 5$  А при будь-яких значеннях номінального первинного струму  $I_{1ном} = 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600$  А. Звідси їхній коефіцієнт трансформації дорівнює  $K_{та} = I_{1ном}/I_{2ном} = I_{1ном}/5A$ .

Конструкція ТС показана на рис. 1.1в та містить магнітне осердя зі сталі, первинну обмотку з малою кількістю витків  $W_1$  з проводу великого перерізу та вторинну обмотку з більшою кількістю витків  $W_2$  із проводу малого перерізу. До вторинної обмотки ТС підключені котушки струмових реле КА1, КА2.

Принцип дії ТС заснований на законі повного струму, законах Фарадея і Ленца. Закон повного струму описує явище перетворення електричного струму в магнітний потік

$$I_1 W_1 = H l_{mc} \rightarrow \Phi_1 = \mu \mu_0 S_c \frac{I_1 W_1}{l_{mc}}, \quad (1.1)$$

де  $I_1 W_1$  – магніторушійна сила (МРС) або ампервитки;

$I_1$  – величина струму через первинну котушку з кількістю витків  $W_1$ ;

$H$  – напруженість магнітної силової лінії  $L_{MC}$ ;

$\Phi_1$  – величина магнітного потоку, створеного первинною котушкою,

$\mu, \mu_0$  – відносна й абсолютна магнітні проникності сталі й повітря,

$S_c$  – переріз магнітопровода;

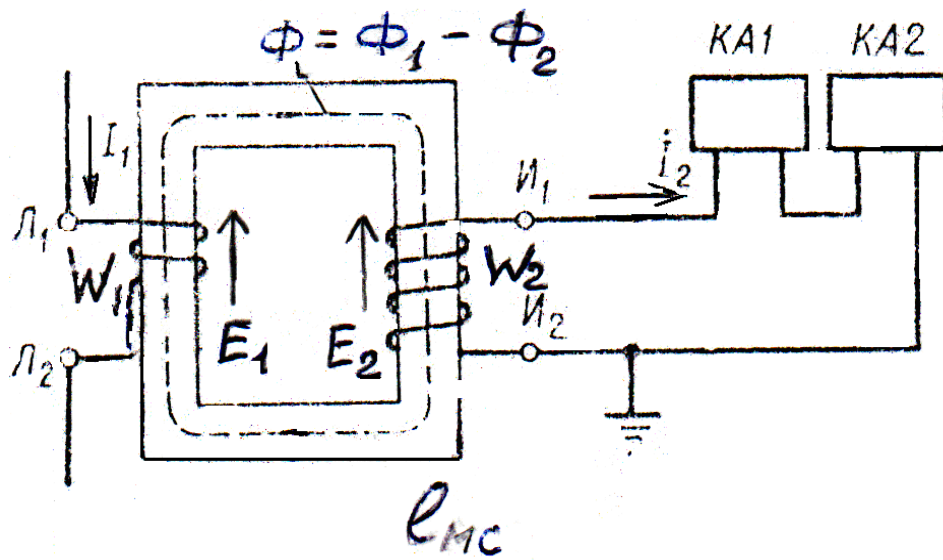
$L_{MC}$  – довжина магнітної силової лінії.

Змінний магнітний потік  $\Phi_1$  відповідно до закону Фарадея індукуює (наводить) у первинній і вторинній обмотках ТС відповідно ЕРС самоіндукції  $E_1$  і взаємоіндукції  $E_2$ :

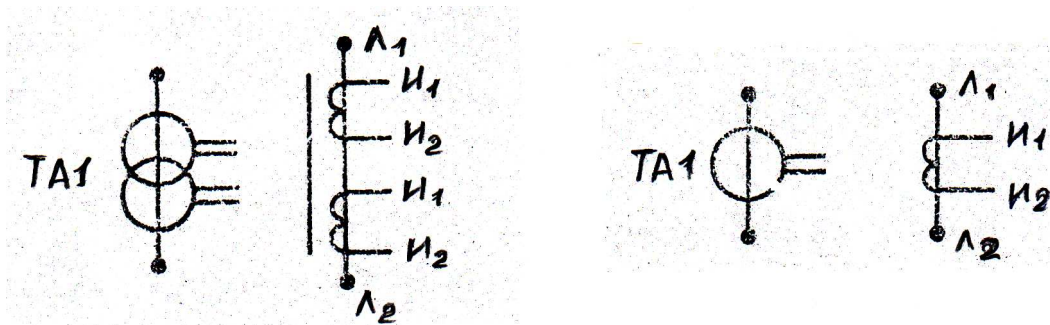
$$E_1 = 4,44 f \Phi_1 W_1; \quad E_2 = 4,44 f \Phi_1 W_2, \quad (1.2)$$

де  $f = 50$  герц - частота мережі.

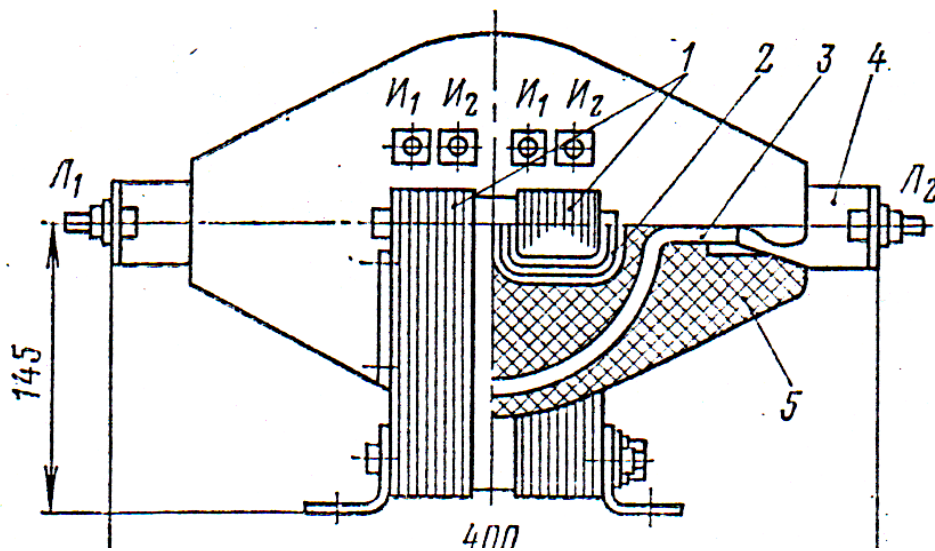
Струм  $I_2$  вторинної котушки створює магнітний потік  $\Phi_2$ , що відповідно до закону Ленца спрямований зустрічно  $\Phi_1$ , тобто віднімається від нього. Їхня різниця  $\Phi_0$  називається потоком  $\Phi_0$  намагнічування.



а)



б)



в)

**Рис. 1.1 – Трансформатор струму типу ТПЛ-10:**  
а) принцип дії; б) графічне позначення; в) зовнішній вигляд



Рівнянням потоків відповідає рівняння МРС обмоток:

$$I_1 W_1 - I_2 W_2 = I_0 W_1, \quad (1.3)$$

де  $I_0$  – струм намагнічування ТС, як складова первинного струму.

З рівняння (1.3) вторинний струм ТС дорівнює

$$I_2 = \frac{(I_1 - I_0)W}{W_2} = \frac{I_1 - I_0}{K_{TA}}, \quad (1.4)$$

де  $K_{TA} = W_2/W_1$  – коефіцієнт трансформації ТС, що повинен бути більше одиниці, тому що  $W_2 > W_1$ .

При вимірюванні струму ТС повинна виконуватися рівність  $I_2 = I_1/K_{TA}$ , однак з (1.4) випливає, що  $I_2 < I_1/K_{TA}$  на величину  $I_0$ , тобто з'являється похибка вимірювання струму. Для її зменшення згідно з (1.4) треба зменшити  $I_0 = I_1 - I_2$  за рахунок максимального збільшення вторинного струму  $I_2$ , створюючи режим короткого замикання для вторинної обмотки. Звідси випливає, що збільшення опору навантаження вторинної обмотки ТС приводить до збільшення відносної похибки вимірювання струму, що для релейного захисту не повинна перевищувати 10%.

У технічному паспорті ТС вказують допустиму величину опору  $Z_{2\text{доп}}$  навантаження вторинної обмотки ТС і допустиму кратність первинного струму  $m_{1\text{доп}} = I_1^{(3k)} / I_{1\text{ном}}$  струму, тобто перевищення первинного струму  $I_1^{(3k)}$  трифазного к. з. над номінальним значенням первинного струму  $I_{1\text{ном}}$ .

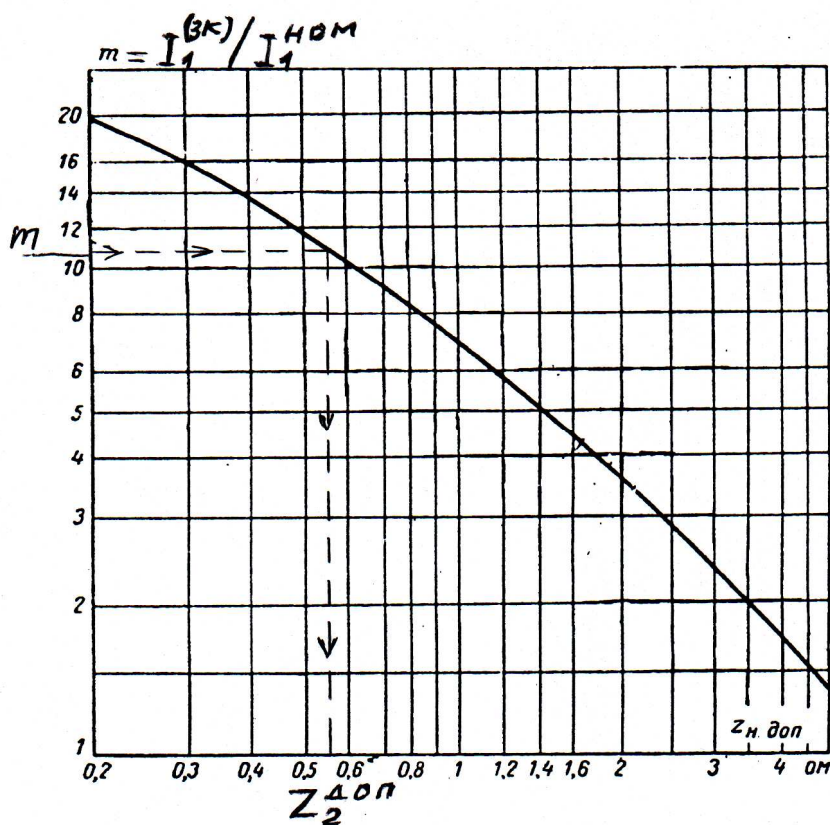
Для визначення допустимого опору навантаження ТС використовують також криві 10%-ої кратності ТС, які являють собою залежність допустимого опору навантаження від кратності первинного струму, як показано на рис.1.2.

Перевірка ТС на допустиму похибку полягає у визначенні допустимої величини опору навантаження вторинної обмотки ТС при відомій кратності, як показано для приклада на рис. 1.2, тобто для кратності  $m = 10,5$  відповідає допустимий опір навантаження  $Z_{2\text{доп}} = 0,57$  Ом.

Якщо при розрахунках виявиться, що розрахункова кратність струму перевищує допустиму, то необхідно пропорційно зменшити величину допустимого опору навантаження вторинної обмотки ТС, і навпаки, якщо виявиться, що більше  $Z_{2\text{рас}} > Z_{2\text{доп}}$ .

Якщо розрахунковий опір навантаження ТС виявиться вище допустимого, то необхідно: 1) приймати ТС із більшим значенням первинного номінального струму, і отже, з меншою кратністю; 2) якщо ТС має дві вторинні обмотки, то їх необхідно з'єднати послідовно, що в 2 рази збільшує допустимий опір, або використати два однакових ТС, вторинні обмотки яких з'єднані послідовно.

У позначенні типу ТС вказують значення первинного й вторинного струмів, наприклад: ТПЛ – 75/5, тобто первинний струм 75 А, а при цьому вторинний – 5А, коефіцієнт трансформації  $K_{TA} = 75/5=15$ .



**Рис. 1.2 – Залежність допустимого опору навантаження вторинної обмотки трансформатора струму типу ТПЛ-10 від кратності первинного струму**

Особливості трансформаторів струму (ТС):

- 1) первинна обмотка ТС включається послідовно з навантаженням, струм якого вимірюється;
- 2) струм у первинній обмотці ТС не залежить від струму й опору навантаження вторинної обмотки, а залежить від опору навантаження в первинному високовольтному колі, струм якого вимірюється ТС;
- 3) магнітний потік  $\Phi_0$  в осерді залежить від вторинного струму й опору навантаження вторинної обмотки;
- 4) трансформатор струму повинен працювати в режимі короткого замикання (к. з.) з метою підвищення точності вимірювання струму, при цьому режим к. з. для ТС не небезпечний, тому що струм  $I_2 = I_1/K_{ТА}$ , а  $I_1 = \text{const}$ ;
- 5) ТС не повинні працювати в режимі холостого ходу (х.х.), тому що останній становиться підвищувальним за напругою, що зростає до величин, небезпечних для ізоляції й персоналу.

У мережах 10 кВ застосовують трансформатори струму типу ТПЛ - 10. Конструкція ТС в одному корпусі містить два осердя, на кожному з яких намотана вторинна обмотка з однаковою кількістю витків, а первинна обмотка охоплює обидва осердя. До вторинної обмотки осердя з більшим перерізом підключають струмове реле, з меншим перерізом - амперметр і лічильник

електроенергії. Першу вторинну обмотку називають релейною, іншу - вимірювальною.

Осердя релейної обмотки виконане більшого перерізу, тому що опір котушок струмових реле в 2 рази більший опору амперметра. Для того, щоб вторинний струм дорівнював  $I_2 = I_1/K_{TA}$  треба збільшити вторинну ЕРС релейної обмотки  $E_{2p} = 4.44f_{2p}BS_p$ , де  $S_p$  – переріз осердя релейної обмотки, а  $I_2 = E_{2p}/Z_{2p}$ , де  $Z_{2p}$  – опір котушок реле.

Технічні характеристики ТПЛ-10-75/5 за табличкою: напруга 10 кВ, первинний струм - 75 А, кратність струму - 7, опір навантаження - 0,6 Ом, клас точності - 0,5, тобто відношення абсолютної похибки коефіцієнта трансформації до його номінального значення. Перевірка ТС полягає у вимірі опору ізоляції більше 10 Мом і класу точності.

## 1.2. Електромагнітні реле струму

Основний елемент реле струму - електромагніт змінного струму, що містить осердя з котушкою і якір, що, притягаючись до осердя, змикає контакти. Умова притягання якоря до осердя

$$F_{\text{э}} = K \frac{I_c W}{h} = F_n, \quad (1.5)$$

де  $F_{\text{э}}$  – сила тяги електромагніта, Н;

$K$  - конструктивний коефіцієнт електромагніта, що залежить від типу осердя;

$I_c$  – струм, при якому якір притягається до осердя – уставка спрацьовування реле, А;

$W$  - кількість витків котушки електромагніта;

$F_n$  – сила повернення пружини, що протидіє руху якоря, Н;

$h$  - величина повітряного зазору між якорем і осердям, мм.

З (1.5) впливають способи регулювання уставки  $I_c$  спрацьовування реле:

- 1) зміною кількості  $W$  витків котушки;
- 2) зміною протидіючого зусилля  $F_n$  зворотної пружини;
- 3) зміною величини повітряного зазору  $h$  між якорем і осердям.

Тоді формула для визначення уставки  $I_c$  спрацьовування реле має вигляд:

$$I_c = \frac{F_n h}{KW}, \quad (1.6)$$

При зменшенні струму після спрацьовування реле якір під дією зворотної пружини відпускається від осердя при струмі  $I_0$  відпускання меншому  $I_c$ . Тобто реле має так звану петлю гістерезису при спрацьовуванні, ширина якої

оцінюється коефіцієнтом повернення  $K_{\Pi} = I_0/I_c > 1$ . Для струмових реле  $K_b > 0.8$ . Час спрацьовування реле струму повинен бути менше 0,1 секунди і розраховується з рівняння руху якоря масою  $m_{\text{я}}$ , швидкістю руху  $V_{\text{я}}$  якоря, тобто

$$F_{\text{з}} - F_{\text{н}} = m_{\text{я}} \frac{dV_{\text{я}}}{dt_c}. \quad (1.7)$$

Споживана потужність реле при спрацьовуванні визначається за формулою

$$S_{nm} = I_c \cdot U_c, \quad (1.8)$$

де  $U_c$  – величина напруги на котушці при спрацьовуванні, В.

Опір реле визначається за формулою

$$Z_{pm} = \frac{S_{nm}}{I_c^2}. \quad (1.9)$$

Для побудови релейних захистів застосовуються електромагнітні реле серій РТМ, РТВ, РТ-40.

Реле струму серії РТМ без витримки часу та серії РТВ з витримкою часу називаються реле прямої дії, тобто при спрацьовуванні діють безпосередньо на механізм, що відключає вимикач і тому не мають контактів. Ці реле встановлюються на вимикачах з пружинним приводом до 10 кВ. Функціональна схема реле типу РТМ показана на рис. 1.3.

Котушка 3 реле підключається до вторинної обмотки трансформатора струму ТА. Якір 1 механічно пов'язаний з ударником 2, при спрацьовуванні діє на засувку 5 механізму, що відключає вимикач Q1. Уставка (струм) спрацьовування регулюється перемикачем 4, що ступінчато змінює кількість витків котушки 3. Перевага реле - гранична простота побудови захисту. Недоліки - похибка струму спрацьовування відносно уставки до 20% і значна (до 100 ВА) споживана потужність.

Конструкція реле серії РТВ відрізняється від реле типу РТМ наявністю годинникового механізму для створення витримки часу при спрацьовуванні.

Реле струму серії РТ-40, конструкція та схема якого показані на рис. 1.4 містить П-подібне шихтоване осердя 4 з двома котушками 3, Г-подібний поворотний сталевий якір 5, два контакти 7, зворотна спіральна пружина 9, один кінець якої пов'язаний з якорем 5, а інший з показчиком 10 уставок спрацьовування, значення яких позначені на шкалі уставок 8, барабанчик 6 з піском для усунення вібрації якоря.

Уставка спрацьовування реле регулюється ступінчато за рахунок паралельного або послідовного з'єднання котушок 3 між собою, і плавною зміною кута закручування спіральної пружини 9 за допомогою показчика уставок 10.

При паралельному з'єднанні котушок еквівалентна котушка має кількість витків, однієї котушки в два рази більшого перерізу, а при послідовному -

подвоєна кількість. Тому в першому випадку уставка спрацьовування вище в два рази, чим у другому, згідно з формулою (1.6).

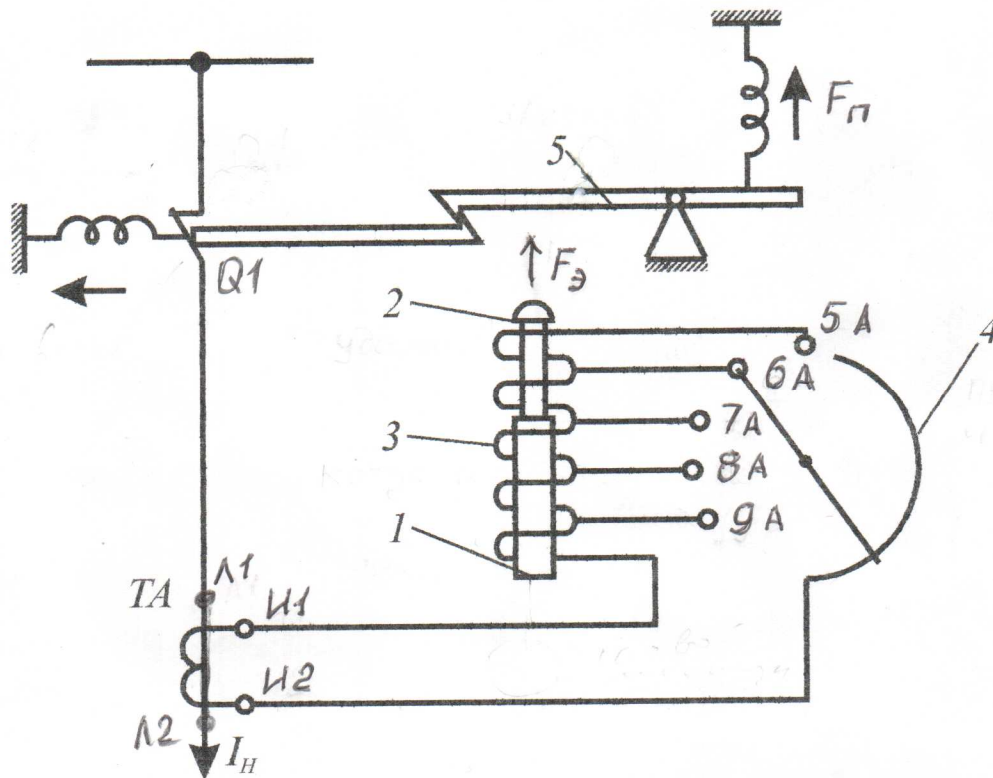


Рис. 1.3- Функціональна схема конструкції реле типу РТМ

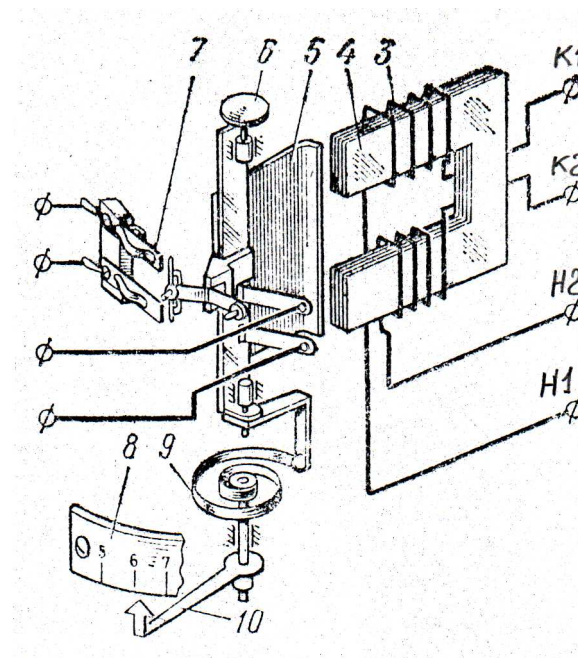


Рис. 1.4 – Конструкція реле типу РТ-40

Значення уставок спрацьовування реле на шкалі уставок позначені для послідовного включення котушок. При з'єднанні котушок між собою паралельно або послідовно необхідно дотримувати умову: у першій котушці

струм втікає в її умовний початок (клема 6), у другій втікає в умовний кінець (клема 8). У цьому випадку створювані котушками магнітні потоки в сердечнику складаються, у протилежному – віднімаються і результуючий потік у сердечнику дорівнює нулю. Реле РТ-40 має високу швидкодію (менше 0,1 секунди) і споживає малу потужність  $S_p < 0,8$  ВА за рахунок малої ваги якоря і його обертання в упорних підшипниках; високий коефіцієнт повернення  $K_v > 0,8$  за рахунок наявності повітряного зазору між якорем і осердям після спрацьовування.

### 1.3. Індукційне реле струму РТ-80

Індукційне реле струму типу РТ-80 є комбінованим і містить три релейних елементи - індукційний елемент (ІЕ), електромагнітний елемент (ЕЕ) і сигнальний елемент (СЕ). ІЕ спрацьовує при струмах перевантаження з витримкою часу, ЕЕ - при струмах КЗ без витримки часу, СЕ фіксує факт спрацьовування реле.

ІЕ містить (рис. 1.5) С-подібне осердя 1, 2/3 перерізу, полюса якого охоплені короткозамкненими (к. з.) витками 2. Між полюсами перебуває алюмінієвий диск 3. На осерді намотана котушка 19, відводи від витків якої виведені на контактну планку 15, кількість яких регулюється гвинтом 21. При протіканні струму по котушці між полюсами осердя 1 створюються магнітні потоки: основний від котушки  $\Phi_0$  і додатковий  $\Phi_k$  від к. з.-витків. Конструктивно в просторі  $\Phi_k$  зсунутий від  $\Phi_0$  на 10 мм, а в часі відстає на 5 тс, як впливає з векторної діаграми на малюнку 1.6б. Це створює обертове магнітне поле, спрямоване убік розміщення к.з. - витків і диск 3 обертається.

Уставкой спрацьовування ІЕ називається величина струму через котушку 19, при якому магнітний потік притягає рухливу рамку 4 з диском 3 до осердя 1. При цьому черв'як 7 на осі диска 3 входить у механічне зачеплення із зубчастим сегментом 8, що піднімається нагору разом з коромислом 9 і якорем 10. Повітряний зазор між якорем 10 і осердям 1 зменшується і він притягається, замикаючи контакт 12.

Уставка спрацьовування ІЕ регулюється ступінчато зміною числа витків котушки згідно з формулою 1.6. Час спрацьовування залежить від швидкості обертання диска й початкового положення сегмента 8.

Уставкой спрацьовування ЕЕ називають величину струму через котушку 19, при якій якір 10 притягається до осердя 1 миттєво без допомоги черв'ячного редуктора. Уставка ЕЕ перевищує уставку ІЕ кратно в 2,4,6,8 разів і регулюється механічною зміною повітряного зазору між якорем 10 і осердям 1, при збільшенні зазору збільшується уставка згідно з формулою (1.6).

Порядок налаштування уставок спрацьовування РТ-80 розглянемо на прикладі. За розрахунковим значенням уставки спрацьовування ІЕ  $I_{уз}^{расч} = 4,3$  А, приймають округлене значення  $I_{уз}^{расч} = 4$  А, що встановлюють на контактній планці 15 гвинтом 21. За розрахунковим значенням уставки спрацьовування ЕЕ



$I_{из}^{расч} = 21A$ , визначають кратність уставки ЕЕ  $I_{ээ}^{крат} = I_{ээ}^{расч} / I_{из}^{прин} = 21/4 = 5,25$ . За розрахунковою кратністю приймають уставку, округлену до чисел 2,4,6,8 убік зменшення, тобто  $I_{ээ}^{прин} = 4$ , що встановлюють гвинтом 16.

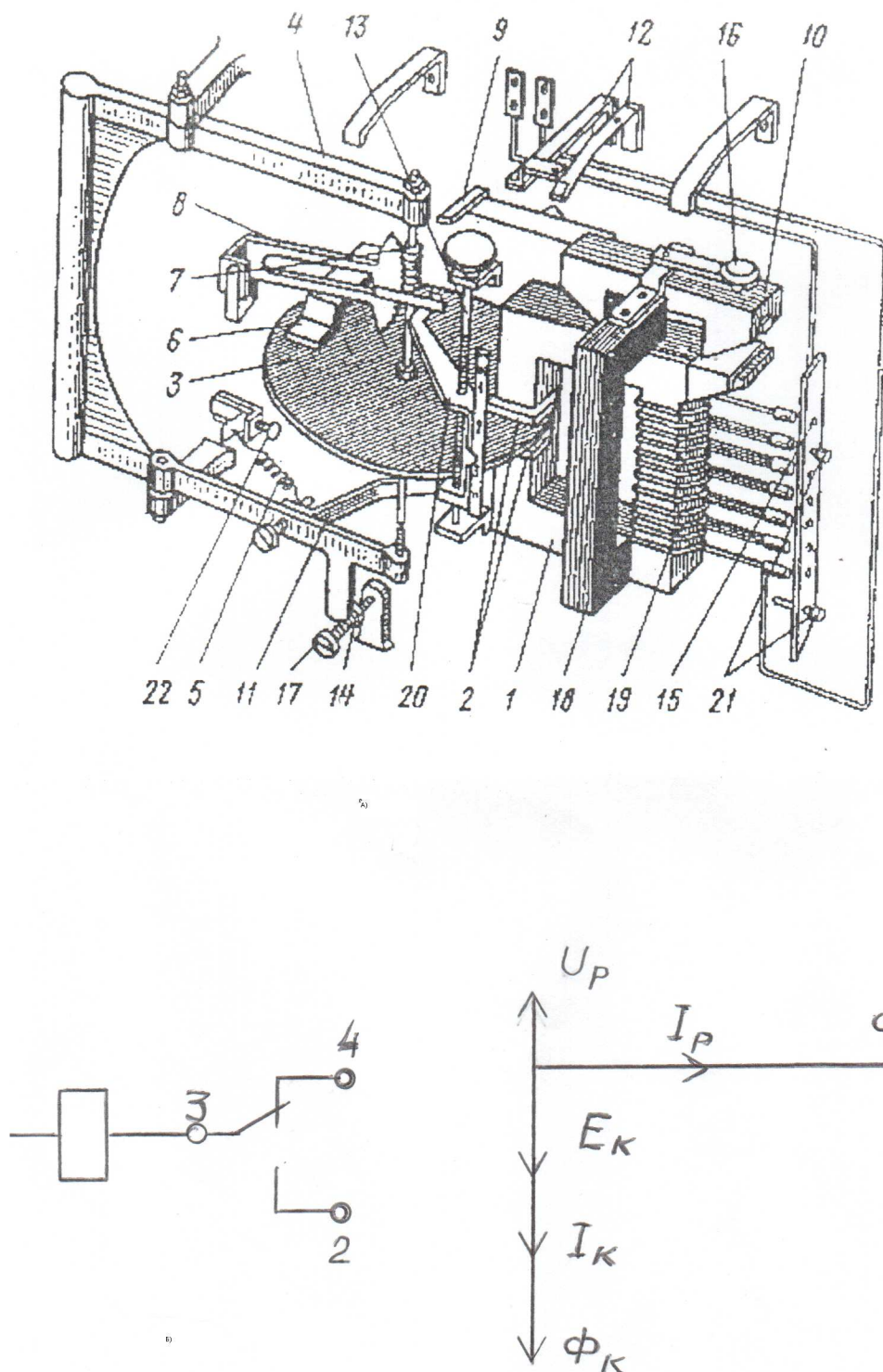
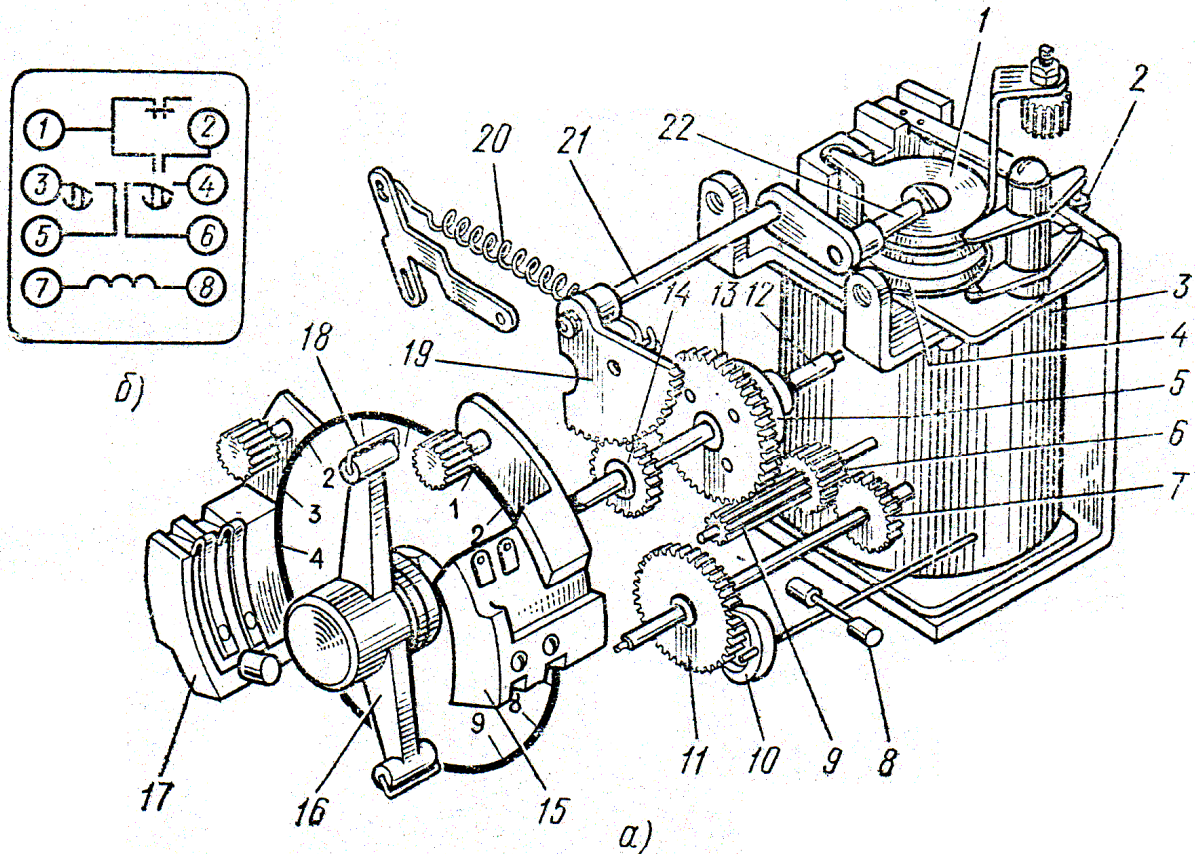


Рис. 1.5 – Конструкція індукційного реле типу РТ-80

## 1.4. Електромагнітні реле часу

Реле часу (РЧ) застосовують для побудови захистів, що спрацьовують з витримкою в часі. Електромагнітні РЧ (рис. 1.6) містять електромагніт постійного або змінного струму, якір якого притягаючись до осердя, запускає годинниковий механізм. Після відліку заданої витримки часу замикаються контакти реле.



**Рис. 1.6 – Електромагнітне реле часу постійного струму типу EB-100:**

**а) кінематична схема; б)- внутрішня схема;**

- 1- циліндричний якорь, 2 - переключаючий контакт, 3 - обмотка реле,  
4 - повертаюча пружина, 5 - фрикційний пристрій, 6, 7 - проміжні шестерні,  
8 - балансир, 9 - зубчастий вал, 10 - анкерна скоба, 11 - анкерне колесо,  
12 - вал, 13,14 - шестерні, 15 - колодка з контактами, 16 - траверса,  
17 - колодка з контактами, 18 - контактний міст, 19 - зубчатий сектор,  
20 - ведуча пружина, 21 - вісь сектора, 22 - опорний болт

Осердя і якір електромагніта змінного струму збираються з окремих лакованих пластин товщиною 0,35 мм для зменшення втрат на вихрові струми.

Параметри реле: 1) номінальна напруга котушки  $U_{\text{ном}}=110,220 \text{ В}$ ;

2) напруга спрацьовування  $U_{\text{сп}} \leq 0,8 U_{\text{ном}}$ ;

3) витримка часу (від 0,5 до 5 секунд).



При  $U_{ном}$  температура котушки не перевищує допустимої, при  $U_{ср}$  якір притягається до осердя. Витримка часу перевіряється за допомогою електросекундоміра за схемою рис 1.7. Після відліку часу контакт КТ1 реле шунтує котушку електросекундоміра, зупиняючи хід стрілки.

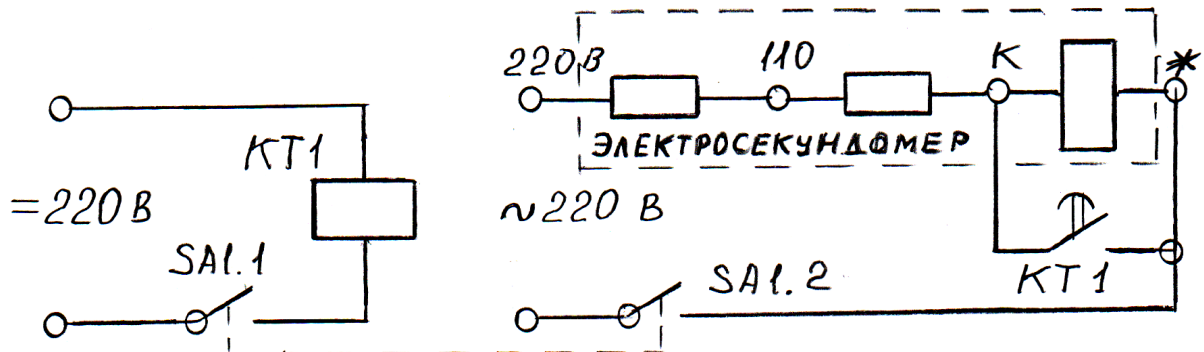


Рис. 1.7 – Схема для перевірки часу спрацьовування реле часу

В електромагнітах змінного струму має місце вібрація якоря, тому що існують ділянки  $t_0$  часу, на яких сила тяги  $F_3$  електромагніта менше сили  $F_{п}$  протидіючої пружини (рис. 1.8б). Вібрація якоря усувається установкою на полюсах осердя короткозамкнених витків (рис. 1.8а). Короткозамкнені витки створюють магнітний потік  $\Phi_k$  в осерді, відстаючий за часом на 5 мс від потоку  $\Phi_1$  котушки (див. рис. 1.6а). Сила  $F_k$ , створена  $\Phi_k$ , утримує якір притягнутим в інтервалі часу, коли  $F_3 > F_{п.}$  (рис. 1.6а).

Струм котушок постійного і змінного струму визначається за формулою

$$I_{пост} = \frac{U_{ном}}{R}; I_{пер} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{R^2 + x^2}}, \quad (1.7)$$

де  $R, x$  - активний й індуктивний опір котушок.

Струм у котушці змінного струму залежить від величини повітряного зазору  $h$  між якорем і осердям, як показано на рис. 1.8а. Якщо  $h$  росте, то зменшуються магнітний потік, ЕРС самоіндукції котушки й індуктивний опір, а струм котушки при цьому росте.

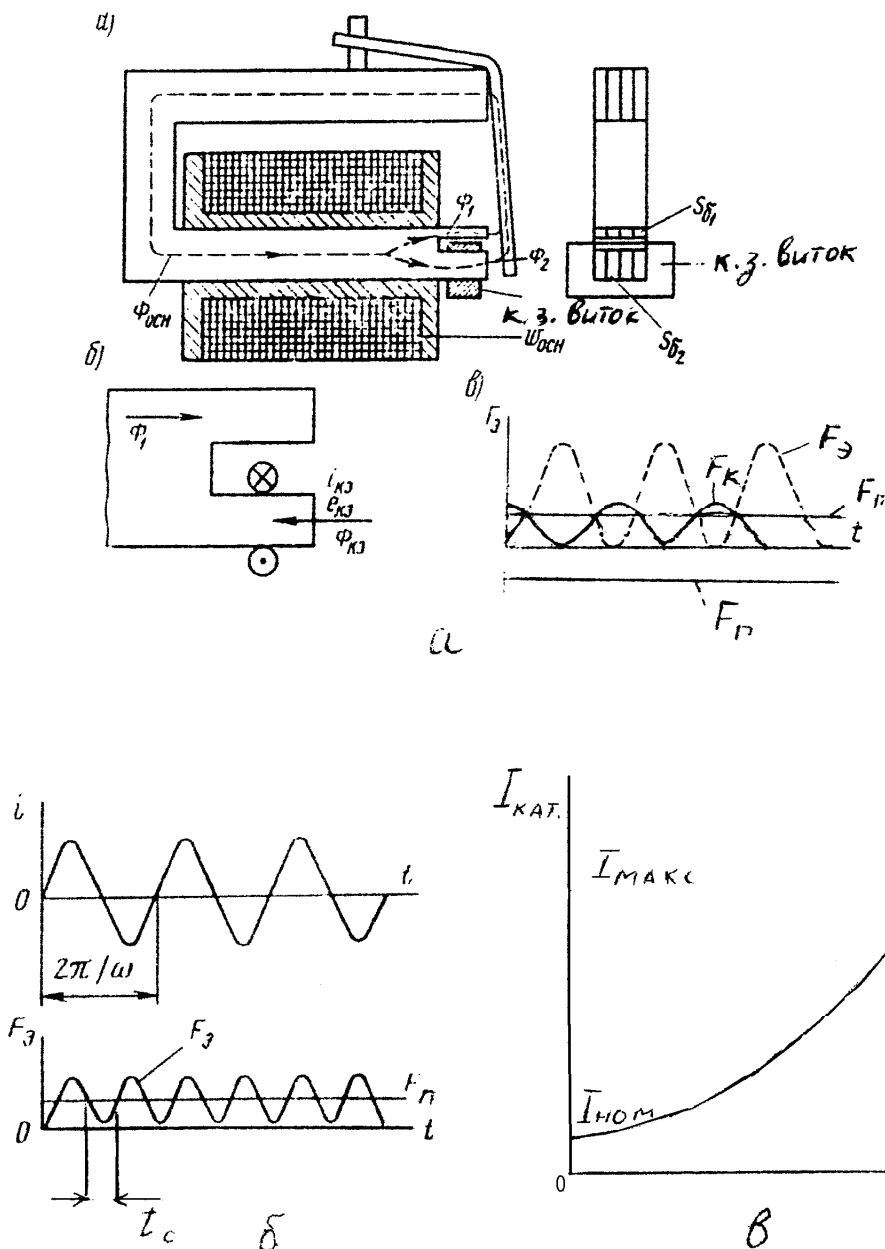


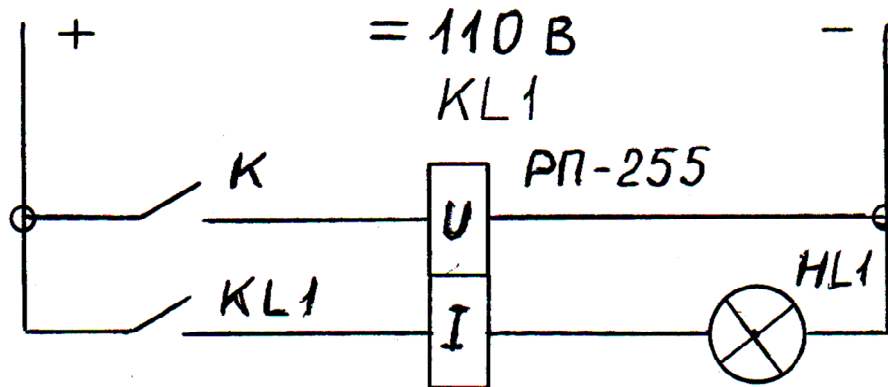
Рис. 1.8 – Електромагніт змінного струму з короткозамкненим витком

### 1.5. Електромагнітні проміжні та сигнальні реле

Реле проміжні (РП) призначені для розмноження контактів струмових реле, в тому числі для відключення вимикачів. РП бувають із котушками постійної й змінної напруги 110, 220 В, або струму 2,5, 5 А, при спрацьовуванні.

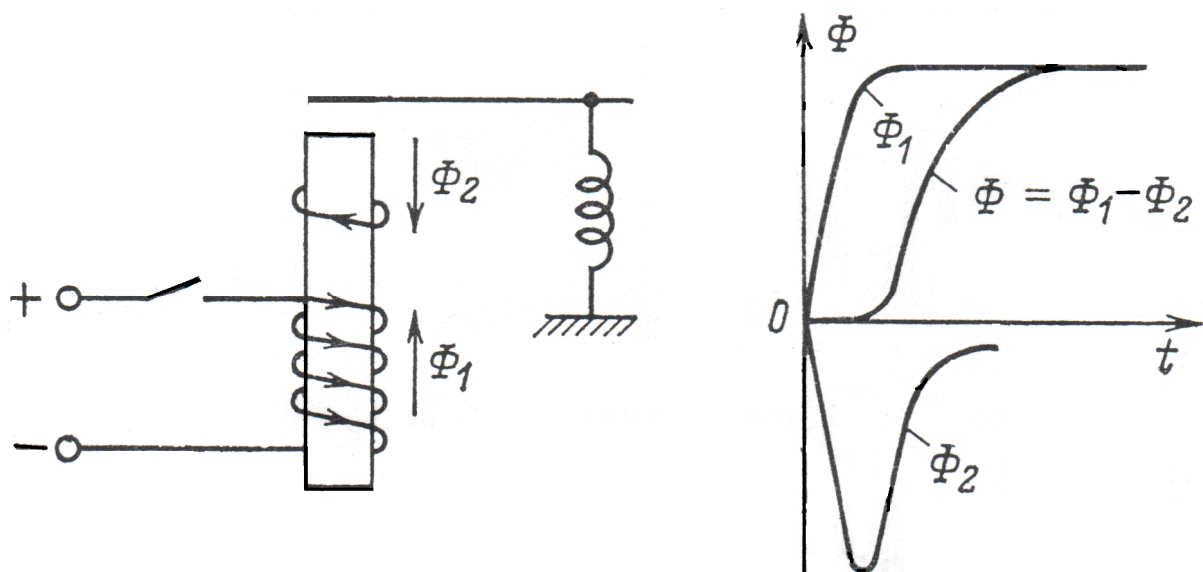
Реле типу РП-255 із використовується в схемах автоматичного повторного вмикання, у схемах газового захисту трансформаторів і в інших випадках короточасного імпульсного замикання контактів захисного реле. Конструкція реле містить дві котушки: напруги (паралельну) і струмову (послідовну). На рис. 1.9 показана схема, що пояснює роботу РП-255. При короточасному замиканні контакту К (наприклад, газового реле) спрацьовує паралельна

котушка реле РП-255 і замикається контакт у колі струмової утримуючої котушки. Після розмикання контакту К реле РП-255 залишається включеним за рахунок протікання струму в утримуючій котушці, величина якого визначається опором лампи HL1, що сигналізує про спрацювання реле К.



**Рис. 1.9 - Схема вмикання проміжного реле з утримуючою струмовою котушкою**

Проміжні реле РП-251, РП-252 забезпечують витримку часу при розмиканні й замиканні контактів відповідно при включенні й відключенні реле за рахунок розміщення на осерді мідних шайб, що виконують роль короткозамкнених витків. Затримка часу на замикання контактів при включенні реле пояснюється тим, що в процесі наростання струму в котушці (рис. 1.10) у мідних шайбах наводиться ЕРС взаємоіндукції, струм і магнітний потік  $\Phi_2$ , зустрічний магнітному потоку  $\Phi_1$  від котушки. При цьому час наростання результуючого потоку  $\Phi_p = \Phi_1 + \Phi_2$  у сердечнику сповільнюється. При відключенні реле час спадання результуючого потоку також сповільнюється, тому що потоки при цьому складаються. Умова перевірки реле по спрацюванню:  $U_c \leq 0,7U_{\text{ном}}$ .



**Рис. 1.10 - Принцип затримки спрацювання реле мідними шайбами**

Реле сигнальне (вказівне, блінкери) призначені для сигналізації й запам'ятовування факту спрацювання кожного із захистів. Котушки КН реле найчастіше бувають постійного струму й найчастіше включаються послідовно з котушками КЛ проміжних реле (рис. 1.11). При цьому струм спрацювання сигнального реле повинен бути менше, ніж у проміжного  $I_c^{KH} < I_c^{KL}$ . Напруга на котушці  $U_{KL}$  при такому включенні знижується до величини:

$$U_{KL} = \frac{R_{KH} + R_{KL}}{R_{KH} + R_{KL}} \cdot R_{KL}, \quad (1.8)$$

де  $U$  – напруга джерела живлення,  $R_{KH}$ ,  $R_{KL}$  – опір котушок реле.

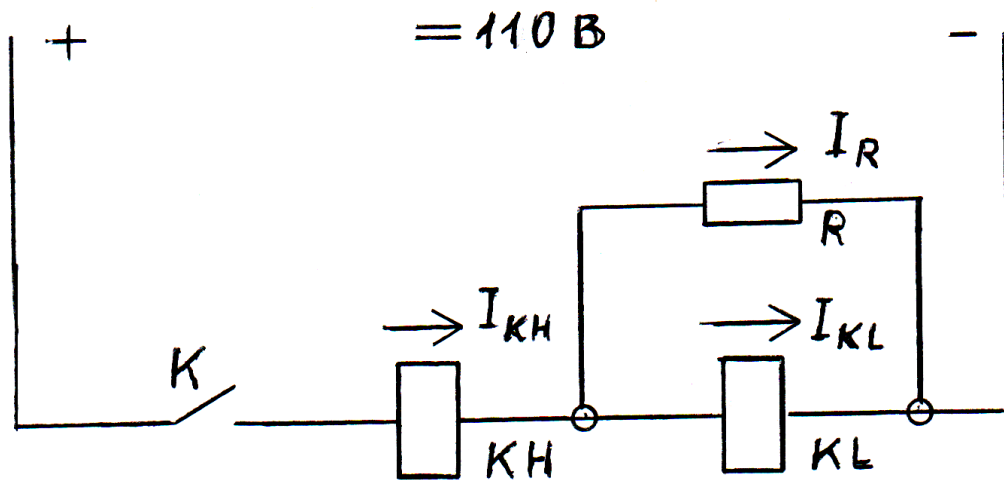
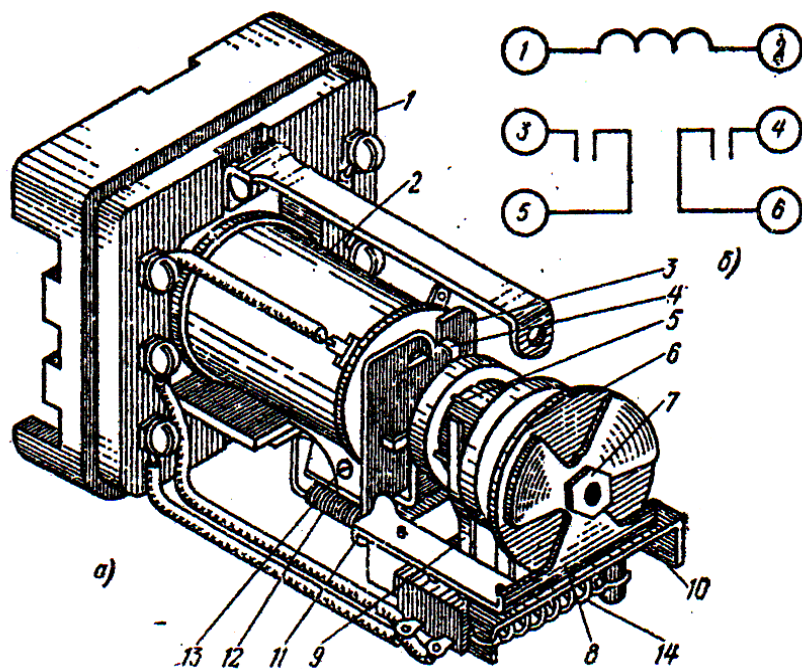


Рис. 1.11 – Схема вмикання сигнального реле

Якщо  $U_{KL} > 0.8U_{KL}^{ном}$ , то РС можна включати послідовно із РП, якщо ні, то застосовують РС із меншим опором. При цьому виявиться, що  $R_{KL} > R_{KH}$  і РС не будуть спрацювати. Для підвищення струму через котушку РС включають резистор паралельно котушці КЛ. Струм через резистор  $I_R = I_c^{KH} - I_c^{KL}$ . Опір резистора  $R = 0.8U_{KL}^{ном} / I_R$ , потужність резистора  $P_R = I_R^2 R$ .

Котушки сигнальних реле включаються послідовно з котушками реле часу при відсутності проміжних реле, як наприклад, у схемі комплекту захисту типу КЗ-12. Один з контактів сигнального реле обов'язково включає живлення на сигнальну лампу з написом «Блинкер не піднятий».

Конструкція сигнального реле типу РУ-21 показана на рис 1.12.



**Рис. 1.12 - Конструкція сигнального реле РУ-21:**

1 - пластмасова основа; 2 - сердечник з котушкою; 3 - якір; 4 - зуб засувки; 5 - контактний місток; 6 - диск із вантажем; 7 - вісь диска; 8 - скоба; 9 - нерухомі контакти; 10 - планка; 12 - зворотна пружина якоря; 14 - зворотна пружина планки

## 1.6. Реле з внутрішніми трансформаторами струму

До таких реле відносять моторні реле часу РВМ-12 і проміжні реле РП-341. Конструкція цих реле містить внутрішні трансформатори струму із осердям, що насичується (ТСНО) і забезпечують стабілізацію вторинного струму при зміні в широких межах первинного за рахунок явища насичення осердя. ТСНО містить первинну обмотку, що складається із двох секцій, які включаються між собою паралельно, або послідовно (рис. 1.13). При послідовному включенні секцій магнітний потік у сердечнику досягає потоку насичення  $\Phi_{нас}^{посп} = KI_1(W_1 + W_2)$  при  $I_1=2,5A$ , а при паралельному  $\Phi_{нас}^{парал} = KI_1(W_1 + W_2)/2$  при  $I_1=5A$ , де  $K$  - конструктивний коефіцієнт.

Конструкція реле РВМ-12 і його внутрішня схема показані на рис. 1.14. Витримка часу створюється за рахунок асинхронного мікродвигуна 1, ротор 2 якого через редуктор 3 переміщує раму 4 з рухливими контактами при замиканні клем 9-11 або 11-13 обмотки статора. Вхід реле включається на струми фаз А і С. Контакти КТ1 і КТ2 що проскользяють (імпульсні) і вимагають використання проміжного реле з РП-255 (див. схему на рис. 1.9).

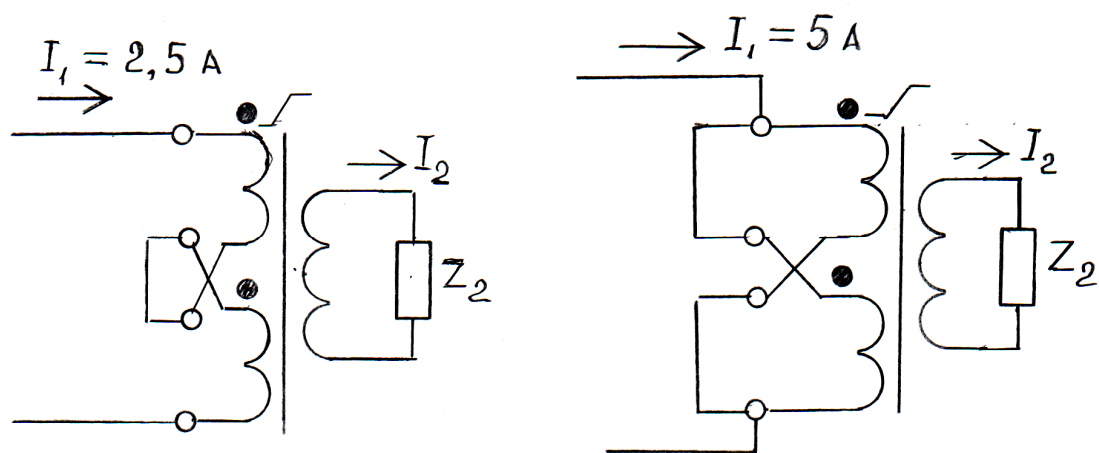


Рис. 1.13 - Схеми вмикання секцій первинної обмотки внутрішнього трансформатора струму

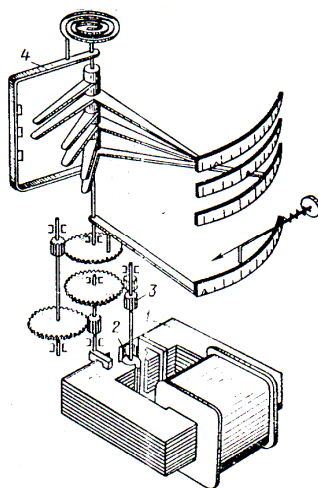
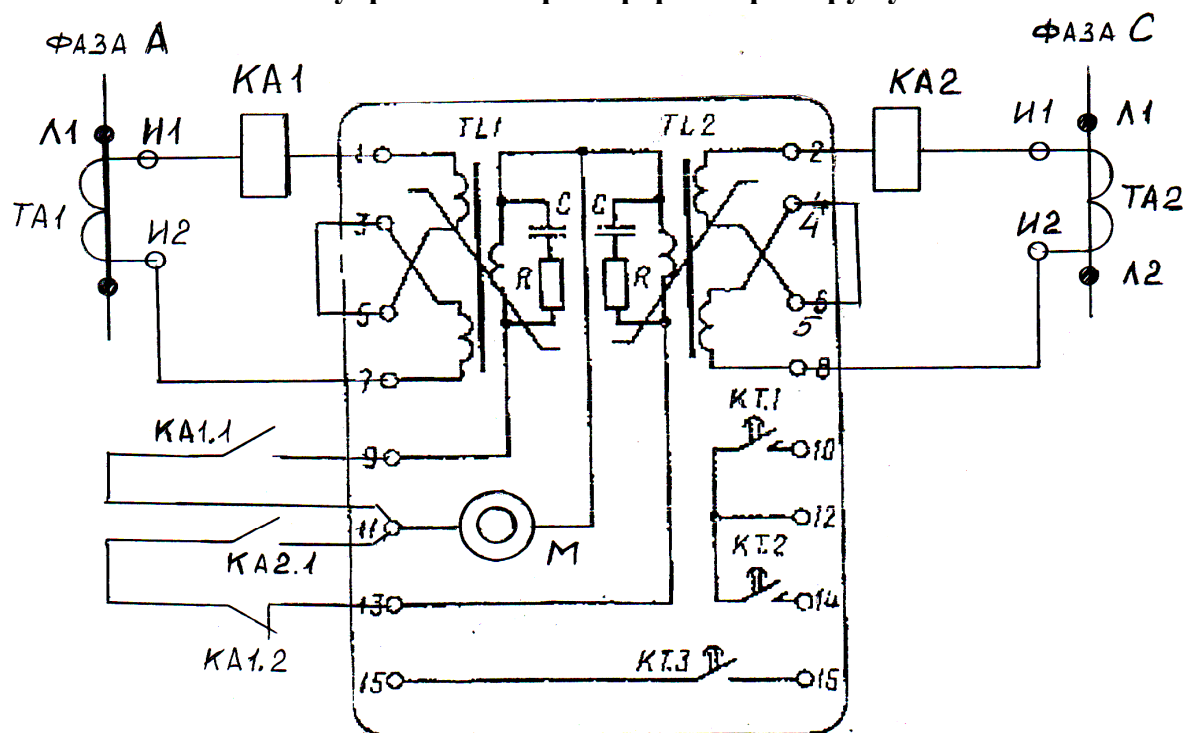


Рис. 1.14-Конструкція та схема моторного реле типу RBM-12

Конструкція реле РП-341 (рис. 1.15) містить: 1) електромагнітне виконавче реле KV, котушка якого через випрямляч VS1 підключена до вторинної обмотки TL2; 2) два перекидних контакти KL1, KL2, один із яких включає електромагніт, що відключає, YAT; 3) конденсатор C4. При цьому контакт KL2 при спрацьовуванні спершу замикає замикаючий контакт 8,9 (4-6 на схемі), а потім розмикає розмикаючий контакт 7-9 (4-2 на схемі) для запобігання короткочасного розмикання вторинного ланцюга трансформатора струму ТА1.

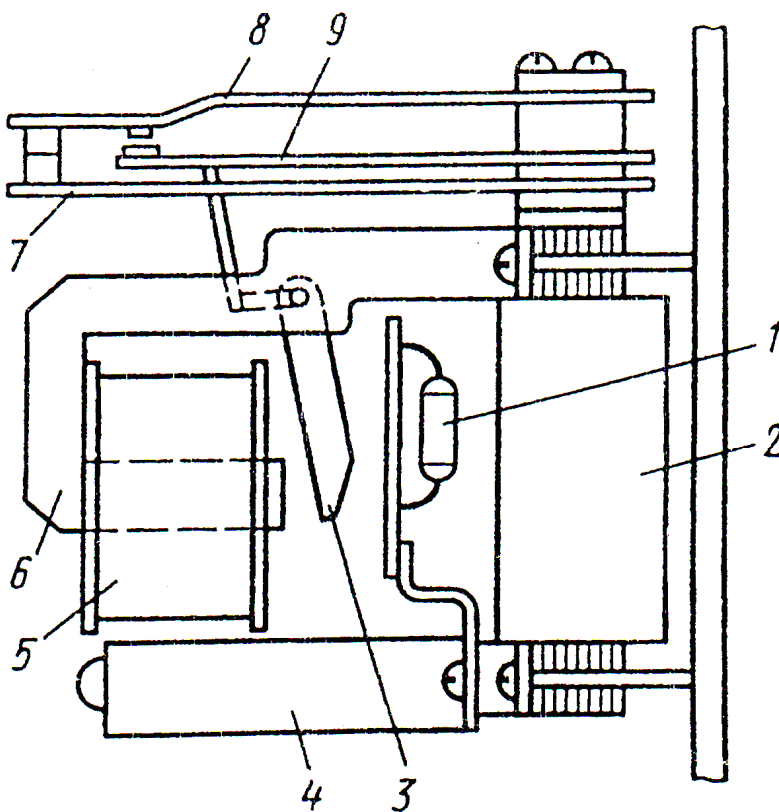
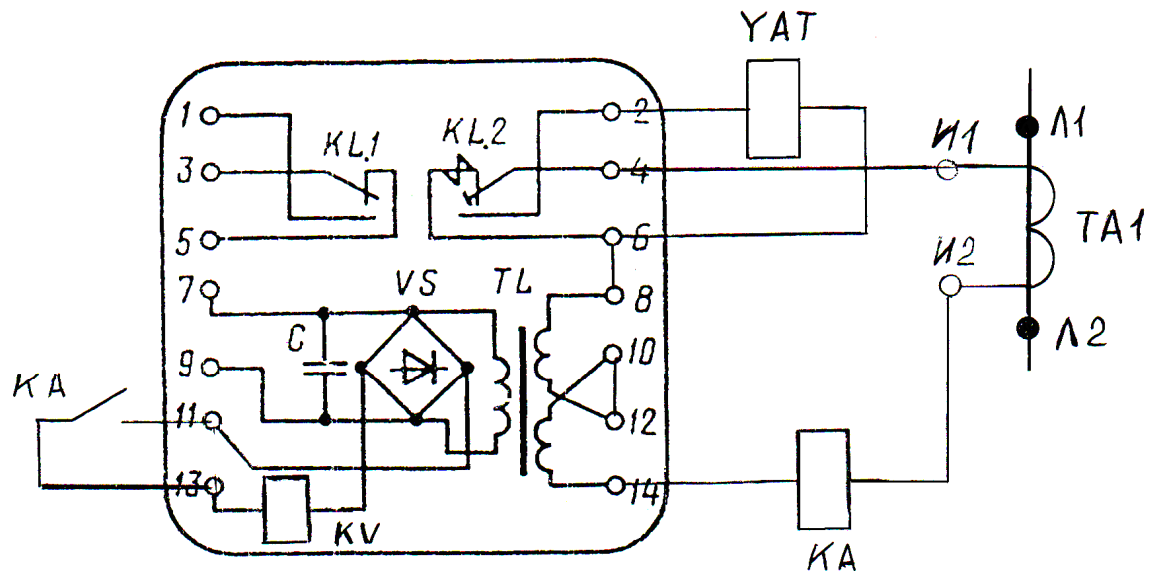


Рис. 1.15 – Конструкція та схема проміжного реле типу РП-341

Номинальним струмом реле РВМ-12 і РП-341 називають струм  $I_H=2,5$  і  $5$  А, при якому обмотки ТСНО не перегріваються. Струмом  $I_c$  спрацьовування реле РВМ-12 називають струм, при якому мікродвигун починає обертатися, а струмом спрацьовування реле РП-341 називають струм, при якому притягається якір 3 до осердя 6 реле КV. Умова перевірки працездатності реле:  $I_c < 0,8 I_H$ .

## 2. СТРУМОВИЙ ЗАХИСТ

Струмовий захист установлюється на всіх елементах високовольтних мереж у якості основного або резервного захисту. Уставка  $I_{cp}$  спрацьовування захисту – величина струму в елементі мережі, при якому струмовий захист спрацьовує. Уставка  $I_{cp}$  спрацьовування струмового реле захисту:

$$I_{cp} = \frac{I_{c3}}{K_{TA}}, \quad (2.1)$$

де  $K_{TA}$ - коефіцієнт трансформації трансформатора струму.

Селективність захисту - здатність захисту спрацьовувати при аварійному режимі тільки на заданому елементі мережі й не спрацьовувати при аваріях на інших елементах. Для забезпечення селективності необхідна відстройка захисту від спрацьовування при аваріях на інших елементах, тобто створення умов неспрацьовування захисту.

Чутливість захисту – здатність захисту спрацьовувати при мінімальному розрахунковому значенні аварійного струму. Захист вважається чутливим, якщо коефіцієнт чутливості – відношення мінімального розрахункового значення аварійного струму  $I_{Amin}$  до уставки спрацьовування  $I_{c3}$  захисту – більше величини, зазначеної в ПУЕ[1],

$$K_{чув} = \frac{I_{Amin}}{I_{c3}} > 1,2; 1,5; 2. \quad (2.2)$$

Спрацьовування захисту - контакти проміжного реле (реле часу) замкнули коло живлення електромагніту, що відключає вимикач. Повернення захисту - після відключення вимикача всі контакти схеми захистів повернулися у вихідне положення. Внутрішнє коротке замикання відбувається на елементі мережі, що захищається, а зовнішнє коротке замикання відбувається на елементах, що живляться від нього.

### 2.1. Схеми включення струмових реле й трансформаторів струму

Для побудови струмових захистів використовують наступні схеми включення струмових реле до вторинних обмоток трансформаторів струму:



схема «повної зірки»; схема «неповної зірки»; схема «вісімки» на різницю струмів; схема «повного трикутника»; схема «розімкнутого трикутника».

Схема «повної зірки» застосовується в мережах із глухозаземленою нейтраллю, тому що потрібно контролювати струми в кожній фазі при однофазних к. з. на землю. (рис. 2.1). При двофазному к. з. струм нульової послідовності в нульовому проводі  $3I_0=0$ . При однофазному КЗ струм  $3I_0$  дорівнює фазному струму. Векторні діаграми вторинних струмів трансформаторів струму для цих випадків показані на рис. 2.1.

Коефіцієнт схеми – відношення струму в котушці реле до струму вторинної обмотки трансформатора струму – для схеми повної зірки  $K_{сх}=I_{KA}/I_2^{TA}=1$ .

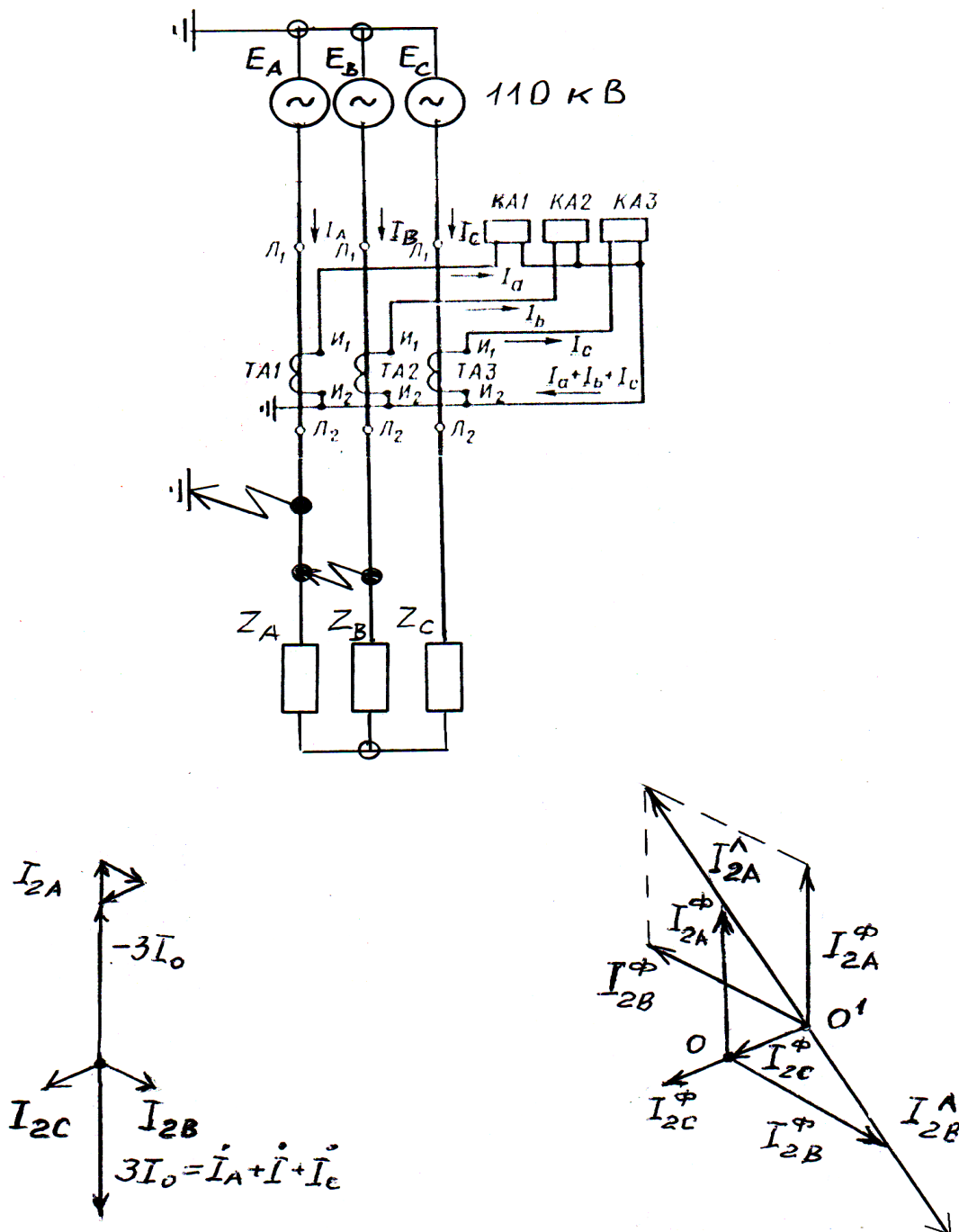
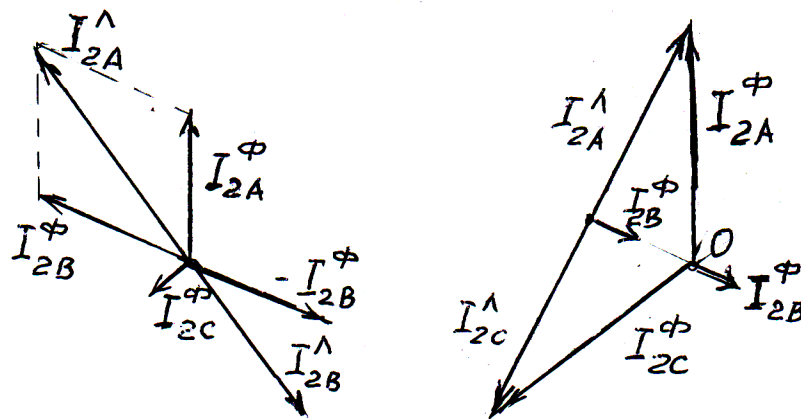
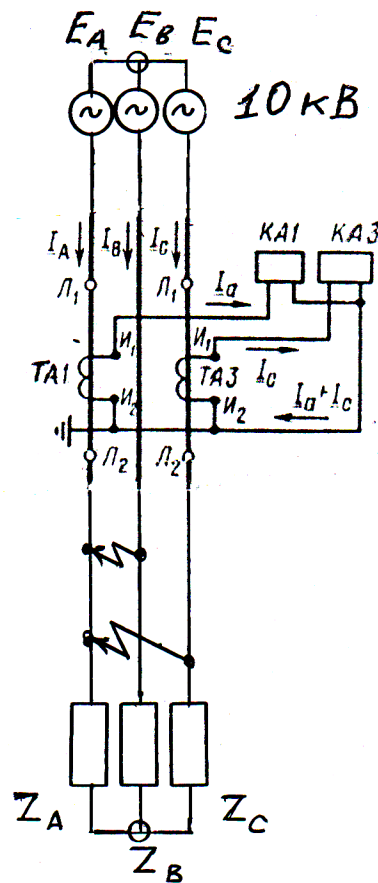


Рис. 2.1 – Схема «повної зірки» та векторні діаграми вторинних струмів



**Рис. 2.2 – Схема «неповної зірки» та векторні діаграми вторинних струмів**

Схему «неповної зірки» застосовують у мережах з ізольованою нейтраллю для захисту від двох- і трифазних к. з., тому досить тільки двох

трансформаторів струму (рис. 2.2). Векторні діаграми струмів для різних комбінацій двофазних к. з. показані на рис. 2.2. Коефіцієнт схеми  $K_{cx}=1$ .

Схему «вісімки» (рис. 2.3) застосовують для захисту високовольтних двигунів і конденсаторів. Коефіцієнт схеми залежить від виду к. з., тобто при двофазному к. з. між фазами АВ і ВС  $K_{cx}=1$  при двофазному к. з. між фазами АС  $K_{cx}=2$ , при трифазному к. з.  $K_{cx}=\sqrt{3}$ .

Схеми «повного» й «розімкнутого» трикутника застосовуються в складних захистах розглянутих нижче для конкретних випадків.

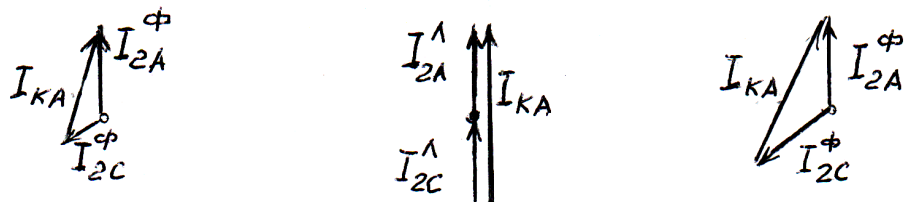
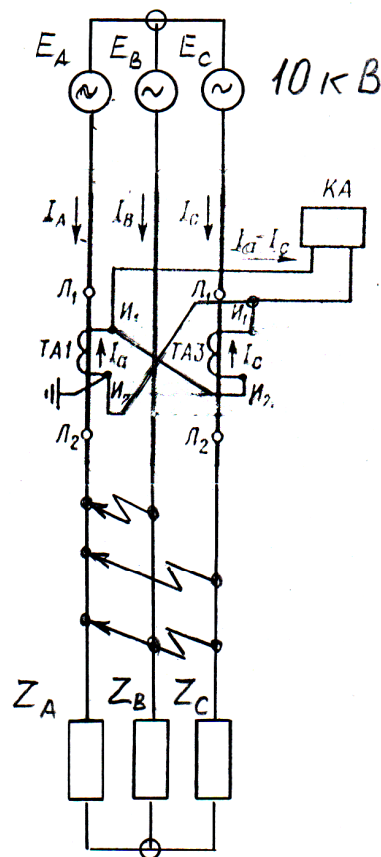


Рис. 2.3 – Схема «вісімки» та векторні діаграми вторинних струмів

## 2.2. Ступеневий принцип побудови струмових захистів

Ступеневий принцип призначений для резервування відмов спрацьовування релейних захистів або їхніх вимикачів.

Сутність ступеневого принципу розглянемо на прикладі, наданому на рис.2.4. На релейній панелі РЗ-1 встановлюється три ступені струмового захисту, тобто три струмових реле, настроєних на різні уставки спрацьовування за струмом та реле часу на різні витримки часу спрацьовування. Перший ступінь захисту називається струмовою відсічкою без витримки часу. Вона призначена для захисту лінії 110 кВ при коротких замиканнях до точки К1 (див. рис. 2.4).

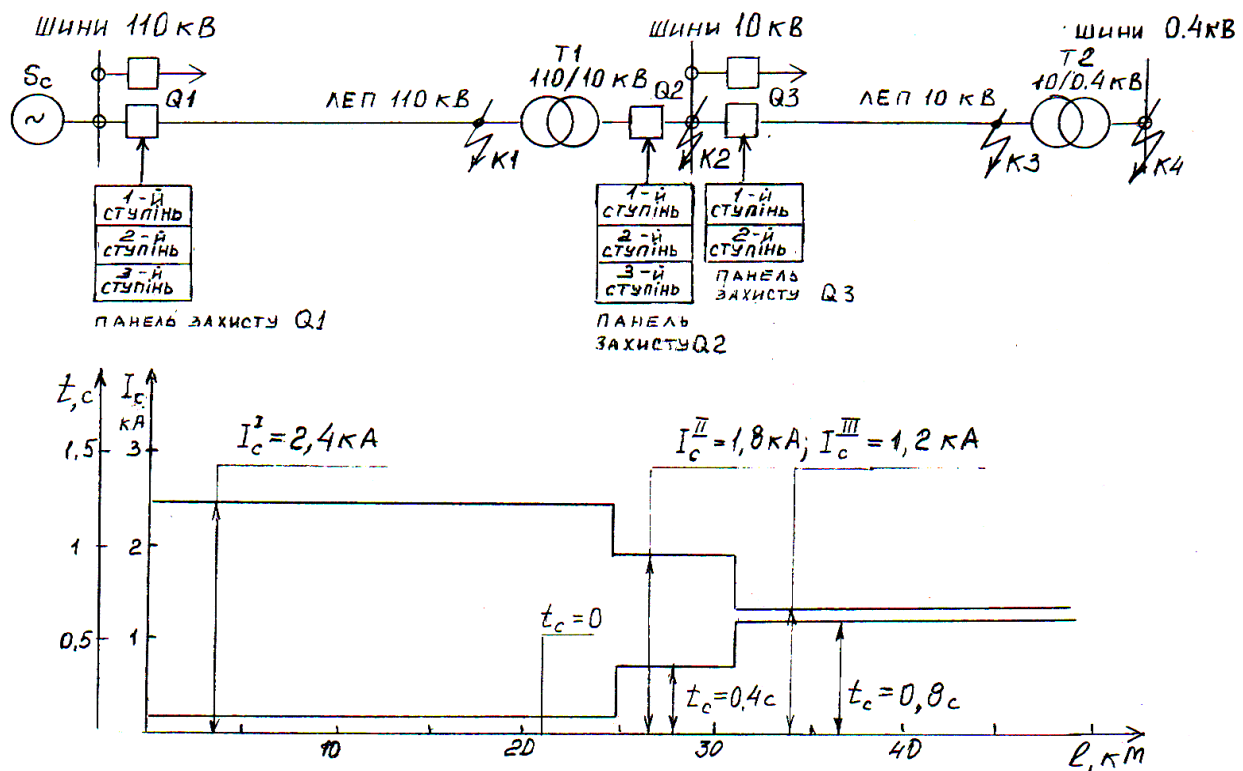


Рис. 2.4 – Ступеневий принцип побудови релейних захистів

Другий ступінь захисту називається струмовою відсічкою з витримкою часу. Вона резервує (дублює) відмову спрацьовування першого ступеню захисту релейної панелі РЗ-2, або якщо вимикач Q2 не відключиться за командою першого ступеня релейної панелі РЗ-2. Тому другий ступінь панелі РЗ-1 настроєний на струм к.з. у т. К2 з витримкою часу на час відключення вимикача Q2.

Третій ступінь захисту панелі РЗ-1 - максимальний струмовий захист (МСЗ) - настроєний на струм к.з. у точці К3 і резервує відмову спрацьовування другого ступеню захисту релейної панелі РЗ-2.

По такому принципу будується релейна панель РЗ-2 вимикачі Q2 щодо захистів вимикача Q3.

Таким чином, сутність ступінчатого принципу побудови захистів релейної панелі РЗ-1 полягає в тому, що уставки спрацьовування за струмом ступенів захистів у міру наближення до джерела живлення ростуть, а витримки часу при їхньому спрацьовуванні зменшуються.

### 2.3. Джерела оперативного струму

Джерела оперативного струму призначені для живлення схем релейного захисту й автоматики, схем керування вимикачами та ін. Бувають джерела оперативного постійного, змінного й випрямленого струму. Джерела постійного оперативного струму - це акумуляторна батарея напругою 110 В та 220 В. Їхнє достоїнство - незалежний і стабільний рівень напруги. Недолік - підвищення капітальних і експлуатаційних витрат на будову підстанції.

Як джерела оперативного змінного струму використовують:

1) трансформатори власних потреб (ТВН) потужністю 10-63 кВА та напругою 10/0,23 кВ;

2) спеціально встановлені для цієї мети вимірювальні трансформатори струму (ТС) зі струмом 5 А і вимірювальні трансформатори (ТН) напруги із вторинною напругою 100 В і потужністю до 0,1 кВА. Структурна схема системи оперативного струму показана на рис. 2.5.

Якщо до них підключити блоки випрямлячів, то одержимо джерела випрямленого оперативного струму. Загальний їхній недолік - нестабільний рівень струму й напруги при коротких замиканнях поблизу підстанції. Бувають випрямляючі блоки живлення струмові, наприклад типу БПЗ-402, і напруги, наприклад типу БПЗ-401, підключені відповідно до трансформаторів струму й напруги. Принципові електричні схеми блоків живлення БПЗ-401 і БПЗ-402 показані на рис. 2.6. Обидва блоки містять у схемі проміжні трансформатори, що насичуються, для стабілізації вихідної напруги та узгодження з величинами вторинних струмів і напруг трансформаторів струму й напруги.

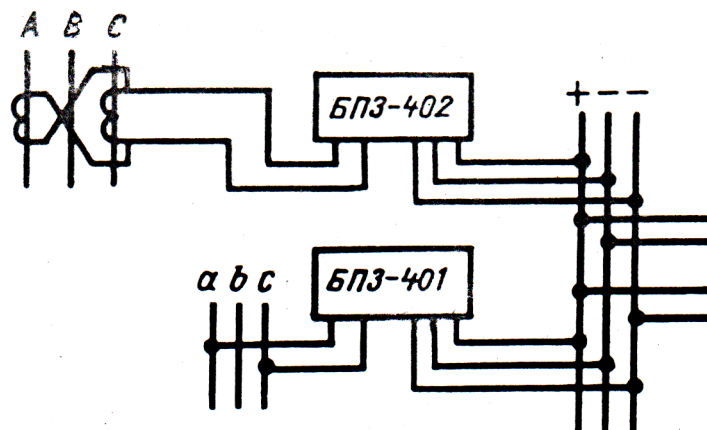


Рис. 2.5 – Структурна схема системи оперативного струму

**Технічні дані блоку БПЗ-401:** номінальні первинні напруги – 100, 127, 220У; вихідні випрямлені напруги – 110, 220 В; номінальна напруга заряду конденсаторів – 400 В.

**Технічні дані блоку БПЗ-402:** номінальний первинний струм – 4-12 А; вихідні випрямлені напруги аналогічні блоку БПЗ-401.

До шин оперативного струму джерела підключаються через автоматичні вимикачі та створюють наступні шинки: шинки живлення електромагнітів вимикачів, шинки живлення схем захисту, шинки сигналізації, шинки освітлення, шинки заряду конденсаторів для живлення електромагнітів відключення вимикачів.

## 2.4. Схемотехніка струмових захистів

У загальному випадку креслення принципової електричної схеми струмового захисту повинне містити: 1) схему, що пояснює місце розташування захистів; 2)

схему первинних і вторинних струмових кіл трансформаторів струму й струмових реле; 3) схему керування вимикачами; 4) схему вимірювальних приладів; 5) схему джерела оперативного струму; 6) текстові пояснювальні написи.

Пояснювальна схема зазвичай в однолінійному виконанні розташовується в лівому або правому верхніх полях креслення. На схемі вказують об'єкт захисту - (лінія або трансформатор), місце установки вимикача з електромагнітами керування, місце й кількість трансформаторів струму.

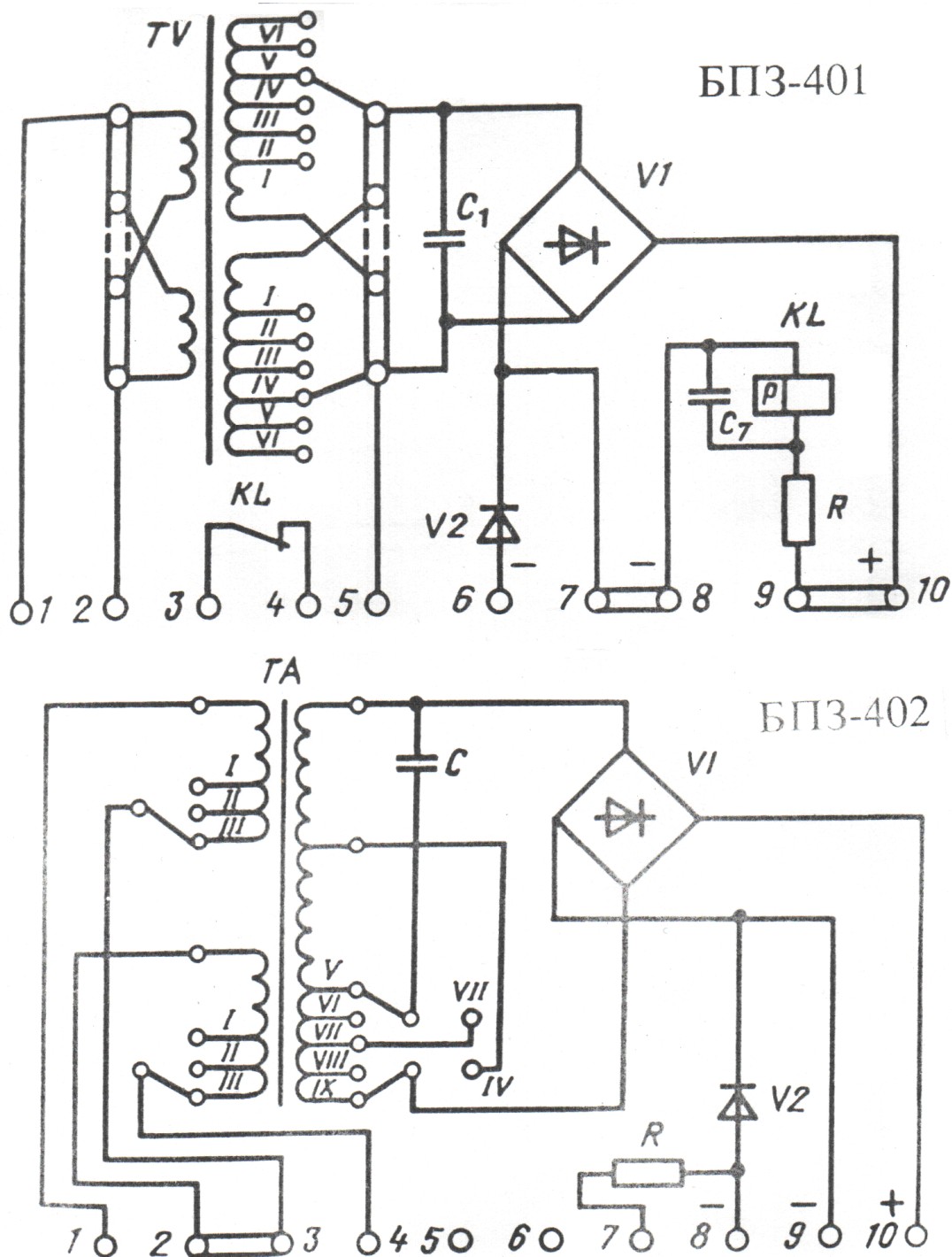
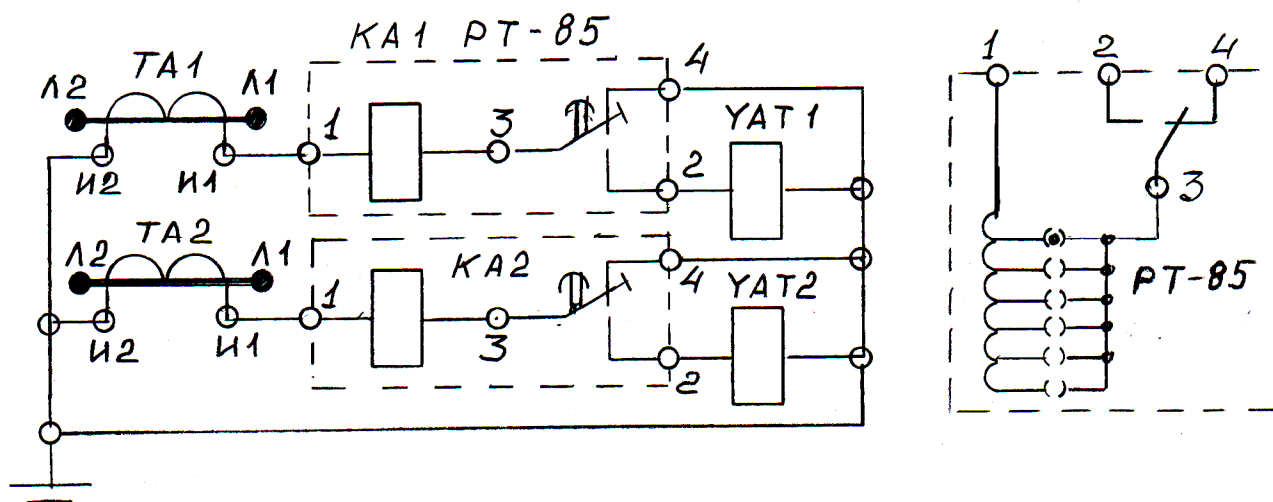


Рис. 2.6- Схеми блоків випрямлячів типів БПЗ-401 та БПЗ-402



Схеми первинних і вторинних струмових кіл у трифазному виконанні містять трансформатори струму й струмові реле. Нижче представлені типові схеми струмових захистів на змінному й постійному оперативному струмі.

Схема струмового захисту лінії 10 кВ, що живить підстанцію із трансформатором 10/0,4 кВ на змінному оперативному струмі. Схема побудована на принципі дешунтування електромагніта відключення вимикача на основі індукційного реле струму типу РТ-85 (рис. 2.7). Схема містить два трансформатори струму ТА1, ТА2, два струмові реле КА1, КА2, два електромагніти відключення УАТ1, УАТ2. Схема реалізує двоступеневий струмовий захист лінії 10 кВ із трансформатором 10/0,4 кВ. Перший ступінь захисту - струмова відсічка реалізована на електромагнітному елементі реле і її уставка спрацьовування настроєна на струм к.з. у межах лінії. Другий ступінь захисту - максимальний струмовий захист із витримкою часу реалізований на індукційному елементі реле і її уставка спрацьовування настроєна на струм у лінії при к.з. наприкінці самої довгої лінії напругою 0,4кВ.

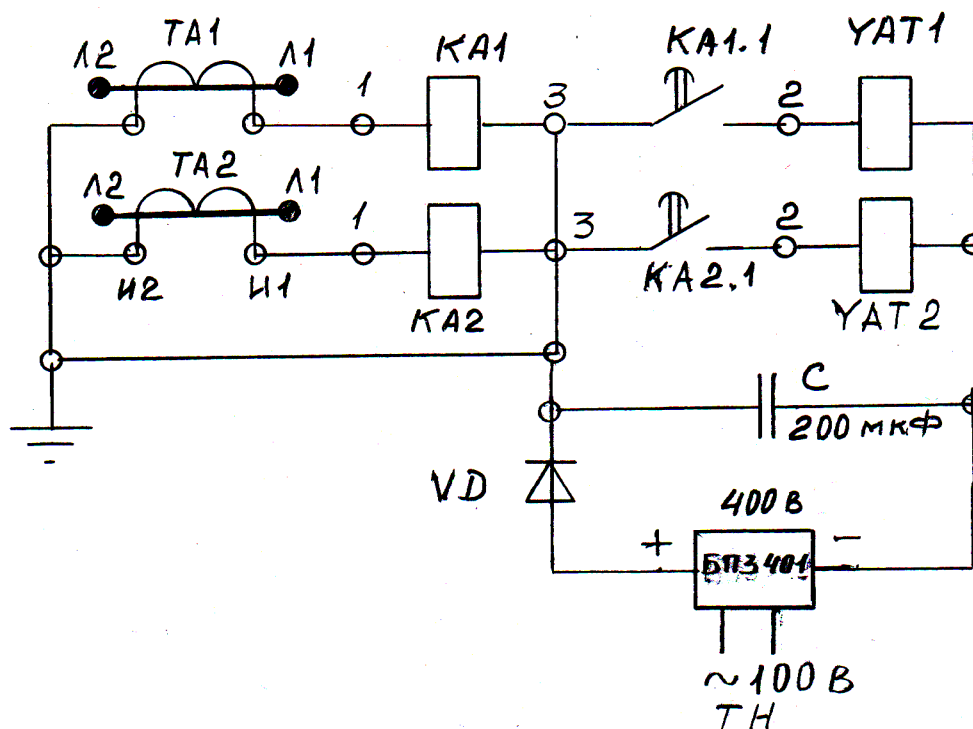


**Рис. 2.7 - Схема двоступеневого струмового захисту на оперативному змінному струмі на основі реле РТ-85 з дешунтуванням електромагніта вимикання**

У нормальному режимі коло живлення електромагнітів УАТ1, УАТ2 відключення розімкнуте контактом 3-2 реле РТ-85. При міжфазних коротких замиканнях спрацьовує реле КА1 або КА2, і в процесі перемикання контакту спочатку замикається контакт 3-2, тобто котушки УАТ1, УАТ2 включаються у вторинне коло трансформаторів струму ТА1, ТА2, а потім розмикається контакт 3-4, тобто котушки УАТ1, УАТ2 дешунтуються, вони спрацьовують і відключають вимикач.

Електромагніт відключення УАТ1, УАТ2 на основі реле прямої дії типу РТМ спрацьовує при струмі  $5 \pm 0,5$  А. При цьому може бути випадок, коли уставка спрацьовування реле КА1 типу РТ-85 менше 5 А. У цьому випадку для спрацьовування УАТ1 використовують енергію попередньо зарядженого конденсатора 3, як показано на схемі (рис. 2.8). У цій схемі діод VD виключає розряд конденсатора через блок живлення при зниженні напруги на вході блоку

живлення під час коротких замикань. При замиканні контакту КА1.1 конденсатор 3 розряджається через котушку УАТ1, яка спрацьовує і відключає вимикач.



**Рис. 2.8 - Схема двоступеневого струмового захисту на оперативному змінному струмі на основі реле РТ-85 з розрядним конденсатором для електромагніта вимикання**

Схема струмового захисту на постійному оперативному струмі на основі комплекту типу КЗ-12. Схема (рис. 2.9) містить два трансформатори струму ТА1, ТА2, два струмових реле КА1, КА2 типу РТ-40, реле КТ1 часу постійного струму типу ЭВ-121 з котушкою напругою 220 В, сигнальні реле КН1 типу РУ-21 зі струмом спрацьовування 10 мА. Комплект використовується для захисту в мережах 6-35 кВ і реалізує один із ступенів струмового захисту: струмову відсічку без витримки часу або максимальний струмовий захист із витримкою часу. При побудові схеми струмової відсічки використовують контакт КТ1.3 без витримки часу реле КТ1, при побудові максимального струмового захисту - контакти КТ1.1, КТ1.2 з витримкою часу. Контакти сигнального реле КН1 включає під напругу лампу «Блиinker не піднятий».

Схема працює за таким способом. При міжфазному к.з. спрацьовує реле КА1 або КА2 від вторинних обмоток трансформаторів струму ТА1, ТА2, включених за схемою неповної зірки. Контакти КА1, КА2 підключають котушку реле часу до джерела оперативного постійного струму напругою 220 В. Один з контактів КТ1.1 або КТ1.3 подає живлення на електромагніт УАТ відключення через замикаючий блок-контакт вимикача Q1.1, який розмикається після відключення вимикача Q1, тому що контакти КТ1.1, КТ1.3 не мають дугогасильних пристроїв для розмикання більших значень струмів. Контакт КТ1.2 включає



сигнальне реле КН1, контакти якого КН1.1 включають сигнальну лампу з написом «Блиinker не піднятий».

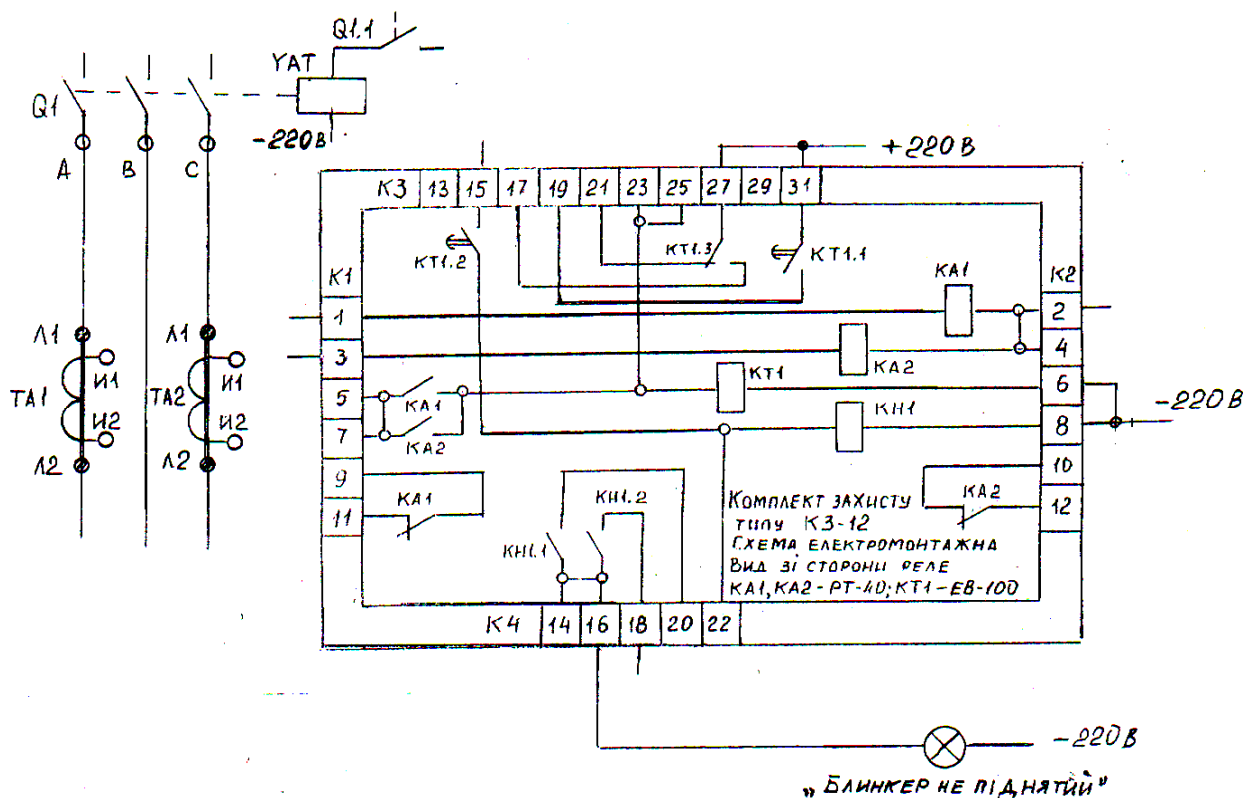
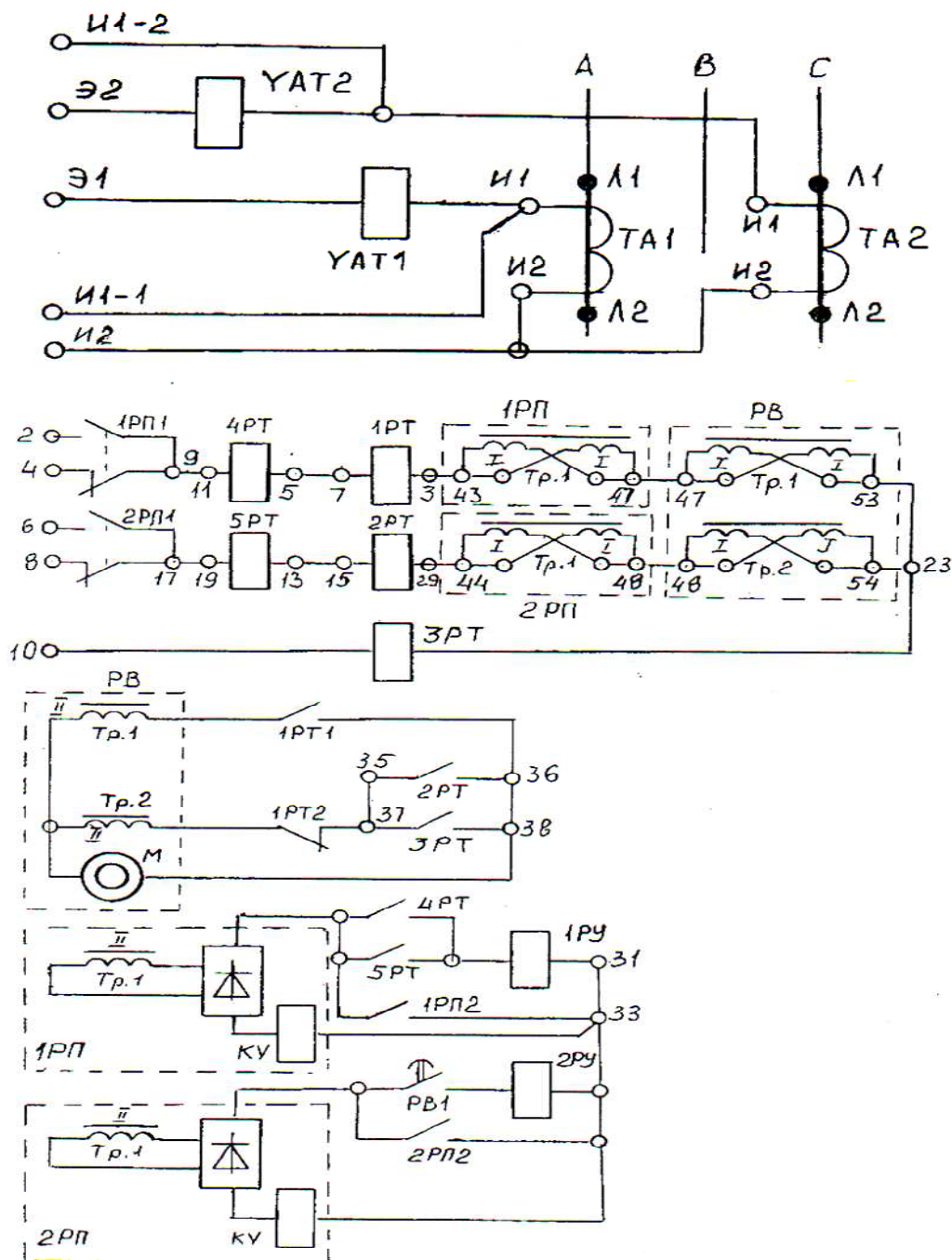


Рис. 2.9 – Схема комплекту захисту типу КЗ-12

Схема двоступінчастого струмового захисту на оперативному змінному струмі. Схема (рис. 2.10) на основі комплекту типу КЗ-37 містить п'ять струмових реле 1РТ-5РТ типу РТ-40, моторне реле РВ часу типу РВМ-12, два проміжних реле 1РП, 2РП типу РП-341, два сигнальних реле 1РУ, 2РУ типу РУ-21, два трансформатори струму ТА1, ТА2 і два електромагніти відключення УАТ1, УАТ2.

Схема працює за таким способом. При двофазних коротких замиканнях між фазами АВ або ВС на лінії спрацьовує струмове реле 4РТ або 5РТ. Їхні контакти підключають коло котушки виконавчого реле КВ, реле 1РП через котушку сигнального реле 1РУ до вторинної обмотки трансформатора, що насичується, Тр1, вбудованого в конструкцію реле 1РП. Реле 1РУ й 1РП спрацьовують. Контакт 1РП2 реле 1РП шунтує котушку 1РУ після його спрацьовування з метою збільшення струму через котушку КВ для надійного втримання якоря. Перемикаючий контакт 1РП1 спершу замикає контакт 2-9, тобто електромагніт відключення УАТ1 включається в коло ТА1, а потім розмикається контакт 4-9, що дешунтує котушку УАТ1, аналогічно схемі рис.2.7.



**Рис. 2.10- Схема захисту на оперативному змінному струмі на основі комплекту захисту типу КЗ-37**

При зовнішніх двофазних коротких замиканнях між фазами АВ або ВС, тобто на стороні 0,4 кВ спрацьовують реле 1РТ або 2РТ максимальні струмові захисти. Реле 4РТ, 5РТ струмової відсічки не спрацьовують, тому що мають більшу уставку спрацьовування. Контакти 1РТ1 або 2РТ підключає мікродвигун М до вторинної обмотки трансформаторів струму Тр1 або Тр2, що насичуються, вбудованих у конструкцію моторного реле РВ часу типу РВМ-12. З витримкою часу контакт РВ1 підключає коло котушки виконавчого реле КВ проміжного реле 2РП через котушку сигнального реле 2РУ до вторинної обмотки трансформатора Тр1, що насичується, котушку реле 2РП. Реле 2РУ і

2РП спрацьовують. Контакт 2РП2 шунтує котушку реле 2РУ для надійного втримання якоря реле 2РП, тому що після дешунтування електромагніта УАТ2 струм у колі зменшується і якор 2РП може відпасти від осердя. Перемикання контактів 2РП відбувається аналогічно 1РП.

При двофазних коротких замиканнях між фазами АС одночасно спрацьовують реле 1РТ і 2РТ, контакти яких створюють коротке замикання між вторинними обмотками ТР1 і ТР2, і мотор М не одержує живлення. Для виключення цього випадку використовують розмикальний контакт 1РТ2.

Струмове реле 3РТ використовують для захисту лінії від двофазних к.з. через опір землі, тобто коли дві фази замикаються на землю на різних відстанях. Уставка спрацьовування 3РТ дорівнює уставкам реле 1РТ, 2РТ.

Схеми струмових захистів після їхнього монтажу, а також періодично в процесі експлуатації піддаються перевірці їхньої працездатності й налаштуванню уставок спрацьовування. Для проведення таких перевірок використовують понижуючий трансформатор із вторинною напругою до 5 В і тривалим струмом до 100 А. Регулювання струму виробляється по первинній обмотці реостатом або автотрансформатором. До вторинної обмотки трансформатора підключають первинну або вторинну обмотки трансформатора струму, підвищують струм до моменту спрацьовування струмових реле.

## 2.5. Захист запобіжниками і автоматичними вимикачами

Запобіжники застосовують для захисту від коротких замикань згідно з нормами технологічного проектування підстанцій тільки в мережах 0,4 - 10 кВ. Запобіжник складається з корпусу 1 і плавкої вставки 2 (рис. 2.11, 2.12).

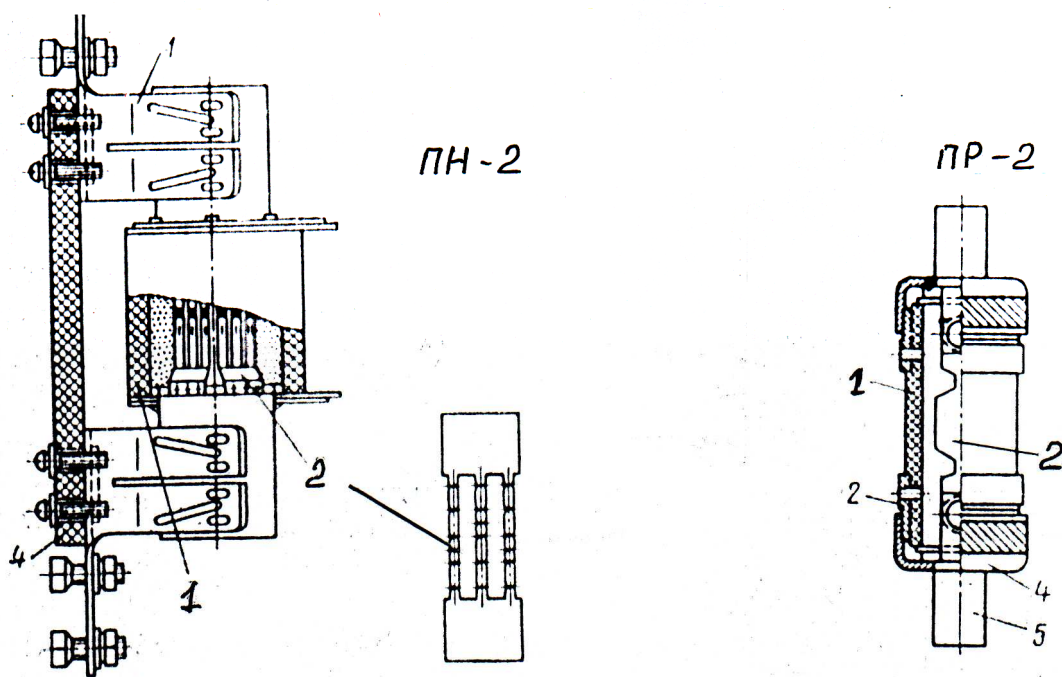
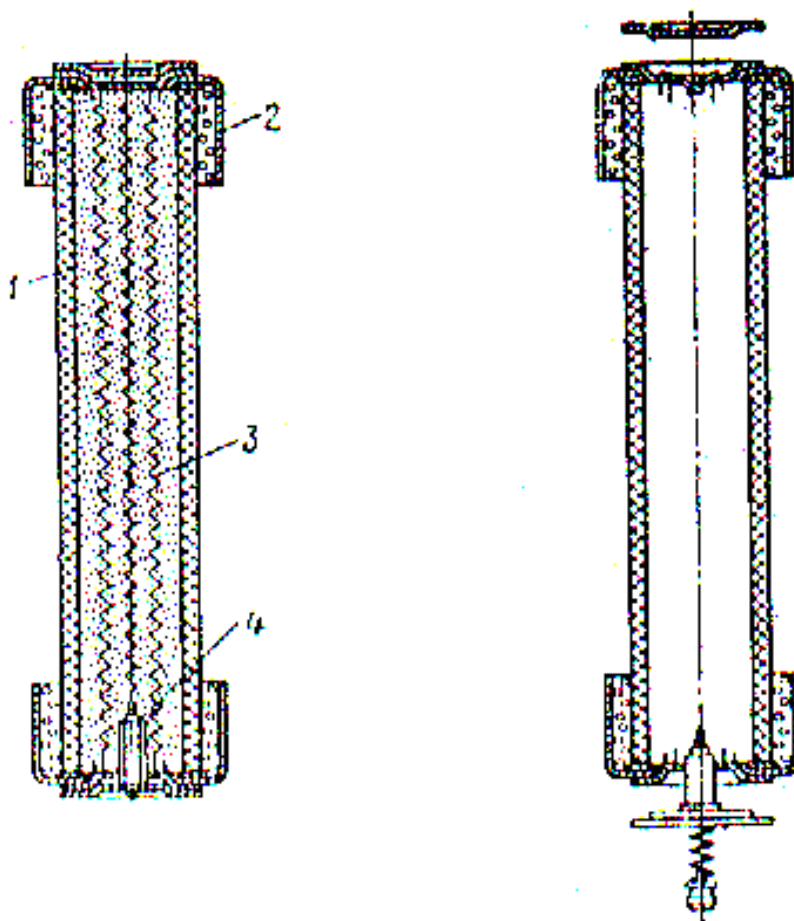


Рис. 2.11 – Конструкція запобіжника напругою 0,4 кВ



**Рис. 2.12 - Конструкція запобіжника напругою 10 кВ**

Номінальним струмом плавкої вставки називають струм, при якому вона залишається в цілості необмежено довгий час. Час спрацьовування (плавлення або перегорання) плавкої вставки визначається її захисною (ампер-секундною) характеристикою, під якою розуміється залежність часу спрацьовування плавкої вставки від величини струму, що протікає через неї (рис. 2.13, 2.14). Корпус запобіжника заповнюють дрібнозернистим кварцовим піском з метою поліпшення умов охолодження плавкої вставки в нормальному режимі й для створення умов швидкого гасіння дуги при її перегоранні.

Вибір запобіжника полягає у визначенні розрахункового струму вставки  $I_{\text{расч}} = 1,5 \cdot I_{\text{макс}}$ , де  $I_{\text{макс}}$  – максимальний робочий струм навантаження. Номінальний струм  $I_{\text{ном}}$  плавкої вставки приймають математичним округленням значення  $I_{\text{расч}}$  у більшу або меншу сторону з урахуванням розкиду захисних характеристик на 20%. Стандартний ряд номінальних струмів плавких вставок для всіх запобіжників: 50, 75, 100, 200, 300, 400, 500, 600 А.

Запобіжники перевіряють на коефіцієнт чутливості згідно з «Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ)», який дорівнює

$$K_{\text{чувст}} = I_{\text{кз}}^{\text{мин}} / I_{\text{ном}} > 3 \quad (2.1)$$

де  $I_{\text{кз}}^{\text{мин}}$  – мінімальний струм короткого замикання,  
 $I_{\text{ном}}$  – номінальний струм плавкої вставки.

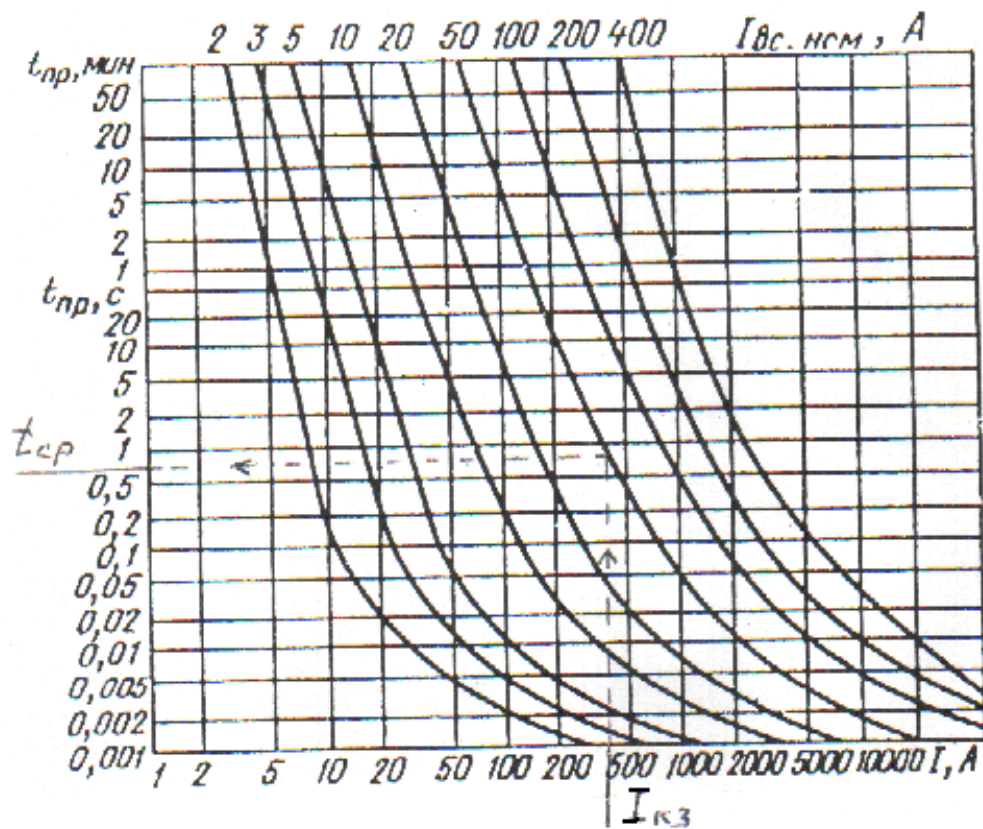


Рис. 2.14- Захисні характеристики плавких вставок запобіжників типу ПКТ-10 напругою 10 кВ

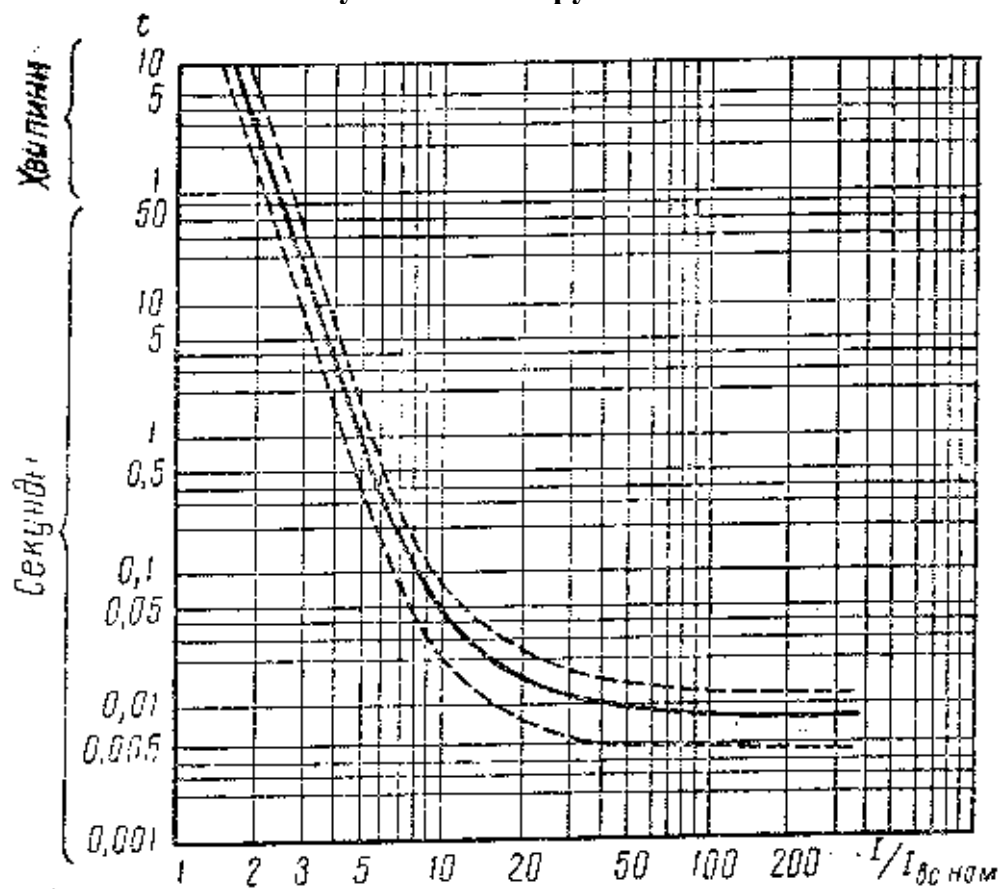


Рис. 2.15- Захисні характеристики плавких вставок запобіжників типу ПН-2 напругою 0,4 кВ



Перевірка селективності спрацювання запобіжників необхідна у випадках їхнього послідовного з'єднання, наприклад у випадку магістральної лінії, що живить кілька трансформаторів 10/0,4 кВ. Тоді при внутрішньому к.з. в одному із трансформаторів повинен спрацювати запобіжник на стороні 10 кВ ушкодженого трансформатора і не спрацювати запобіжник на лінії 10 кВ. Для забезпечення цього необхідно, щоб час спрацювання запобіжника на лінії було в три рази більше часу спрацювання запобіжника на стороні 10 кВ трансформатора. Час спрацювання запобіжників визначається графічно за розрахованим значенням струмів к.з. Якщо захисних характеристик немає, то ця умова виконується, коли номінальні струми послідовно включених запобіжників відрізняються не менш, ніж на два ступені струмового ряду для мереж 0,4 кВ і на один ступінь для мереж 10 кВ.

У мережах 0,4 кВ застосовують запобіжники типу ПР-2, ПН-2 з фарфоровим або фібровим корпусом, заповненим піском (рис. 2.11). У мережах 6 - 10 кВ застосовуються запобіжники типу ПК-10, ПКТ-10, ПВТ-104 з корпусами заповненими піском і показниками спрацювання. У мережах 35 кВ і вище запобіжники не застосовуються.

Перегорілі плавкі вставки варто замінити запасними заводського виготовлення, а при їхній відсутності допускається згідно з «Правилами технічної експлуатації електроспоживачів електроенергії (ПТЕЕ) тимчасово як плавку вставку використати мідний дріт, очищений від ізоляції, відповідно до таблиці 2.1 і перевірений електролабораторією підприємства.

Таблиця 2.1 - Вибір діаметра мідного дроту для плавких вставок для всіх запобіжників.

<b>Шкала номінальних струмів плавких вставок, А</b>	<b>Діаметр мідного дроту, мм</b>	<b>Число паралельних не скручених між собою дротів</b>
15	0,45	1
20	0,55	1
25	0,6	1
35	0,75	1
45	0,9	1
60	1	1
80	0,8	2
100	1	2
125	1,1	2
160	0,9	3
200	1,15	3
300	1,2	4
350	1,3	4

Широке поширення в мережах 0,4 кВ одержали автоматичні вимикачі. Вони реалізують двоступінчастий струмовий захист: струмову відсічку за допомогою електромагнітного розчеплювача, що працює на принципі аналогічному реле прямої дії типу РТМ і максимальний струмовий захист за допомогою теплового розчеплювача з витримкою часу, що працює на принципі біметалічної пластини.

### 3. СТРУМОВИЙ ЗАХИСТ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ

Такий захист застосовується для ліній і трансформаторів у випадках, коли звичайні струмові захисти не забезпечують вимог «Правил улаштування електроустановок» за коефіцієнтом чутливості й за селективністю. Такі захисти являють собою комбінацію двох реле: 1) реле струму, що контролює величину струму, 2) пускове реле, що визначає ступінь несиметрії трифазної системи за напругою або за струмом, що виникає при несиметричних к.з. При цьому контакти струмового й пускового реле включають за схемою, що реалізує логічну функцію  $2I$  (рис. 3.1), де РТОП, РНОП - реле симетричної складової зворотної послідовності струму й напруги.

#### 3.1. Теоретичні основи побудови захистів

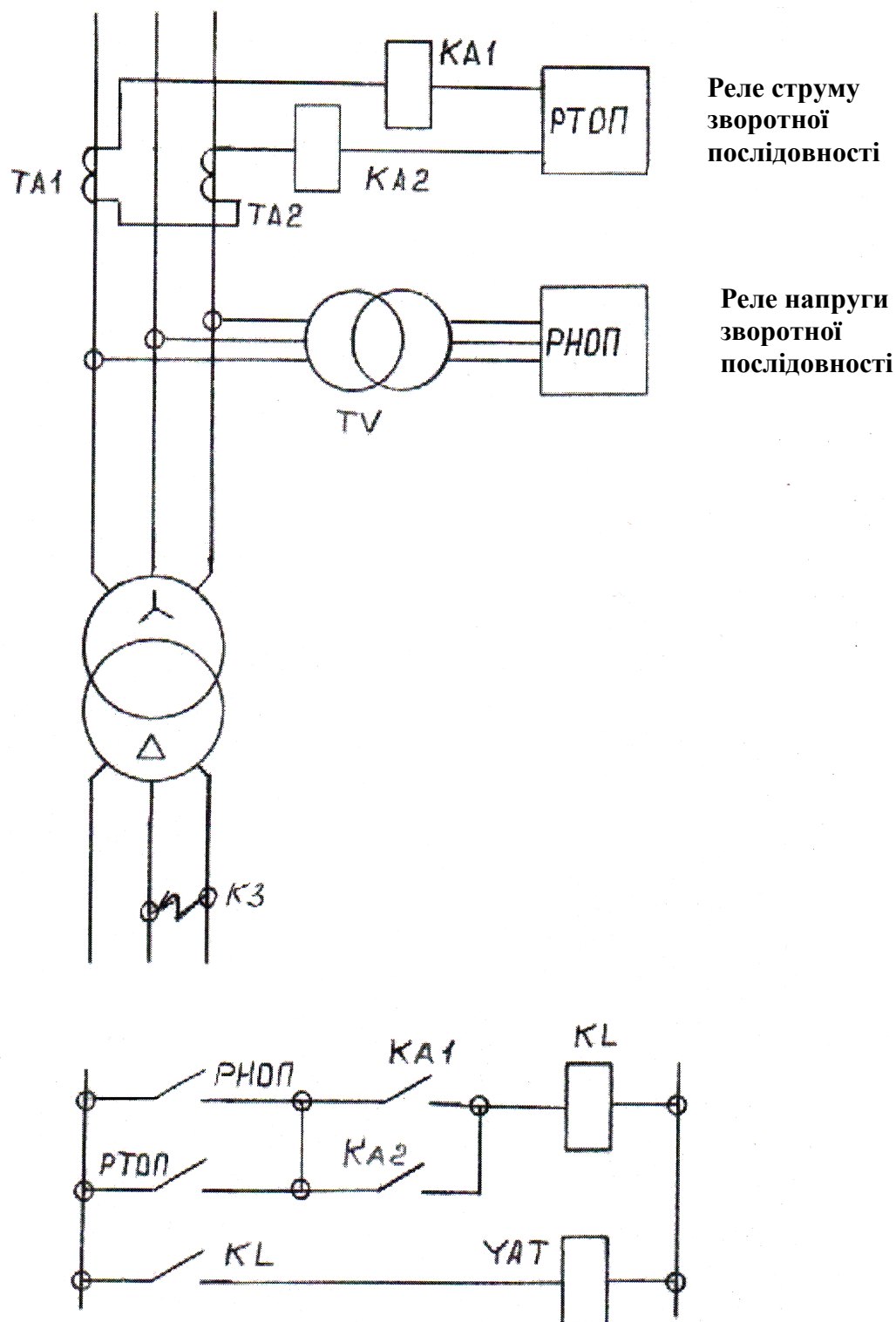
Захисти будуються на основі теоретичного методу симетричних складових. Суть методу полягає в тім, що вихідна несиметрична трифазна система струмів або напруг математично представляється у вигляді трьох симетричних систем, векторне додавання яких дає вихідну несиметричну (рис.3.2). Ці симетричні системи одержали назву:

1. складовій прямої послідовності (рис. 3.2б).
2. складові зворотної послідовності (рис. 3.2в).
3. складові нульової послідовності (рис. 3.2г).

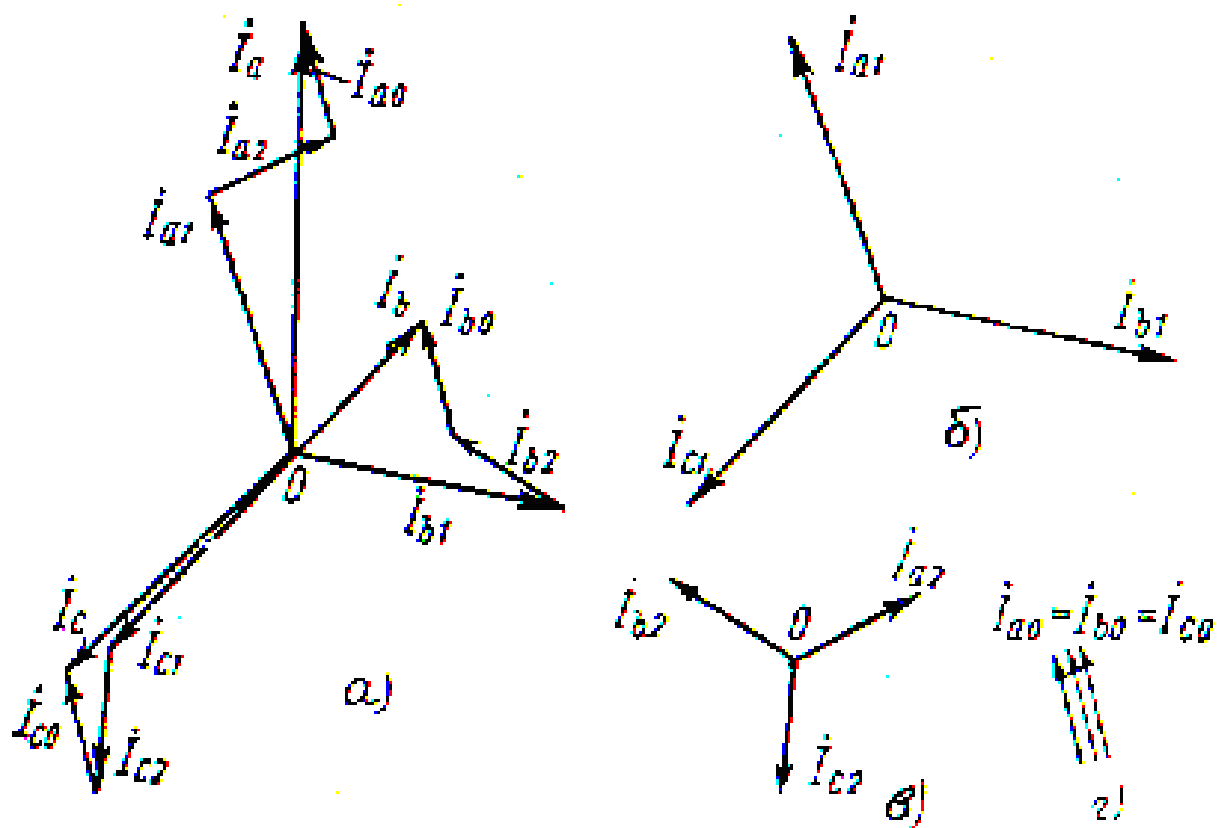
Їхня відмінність між собою полягає в наступному. У системі прямої послідовності вектор струму  $I_{a1}$  фази А випереджає за часом, тобто за фазою, вектори  $I_{b1}$  й  $I_{c1}$  на  $120^\circ$  й  $240^\circ$ , тобто має місце пряме чергування фаз  $A_1B_1C_1$ . У системі зворотної послідовності вектор струму  $I_{a2}$  фази А випереджає вектори  $I_{b2}$  й  $I_{c2}$  на  $240^\circ$  й  $120^\circ$ , тобто має місце зворотне чергування фаз  $A_2B_2C_2$ . У системі нульової послідовності вектори струмів  $I_{ao}=I_{bo}=I_{co}$  не мають фазового зсуву за часом, тобто співпадають за фазою і отже струми не можуть протікати по фазних проводах, а тільки через нульовий провід.

Для виявлення однофазного короткого замикання треба знати величину напруг або струмів нульової послідовності, а для двофазного к.з. теж, але зворотної послідовності. Методика розрахунку складової нульової й зворотної послідовності заснована на том, що підсумовування векторів симетричних складових повинне дати вихідну несиметричну систему, тобто

$$\begin{aligned}
 I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\
 I_b &= I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} \\
 I_c &= I_{c0} + I_{c1} + I_{c2}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$







**Рис. 3.2 – Метод симметричних складових:**  
а) несиметрична система, б) складові прямої послідовності,  
в) складові зворотної послідовності, г) складові нульової послідовності

З системи (3.1) невідомі вектори симетричних складових не можуть бути визначені, тому що їх сім, а рівнянь три. Для зменшення кількості невідомих треба складових векторів фаз В і С виразити через вектори фази А. Для цього використовують так званий оператор повороту  $a = e^{j120^\circ}$ , множення якого на кожний з векторів повертає останній на  $120^\circ$  проти годинникової стрілки без зміни модуля. Множення вектора на квадрат оператора  $a^2 = e^{j240^\circ}$  повертає його проти годинникової стрілки на  $240^\circ$ . Множення на куб оператора  $a^3 = e^{j360^\circ}$  дорівнює самому вектору, тобто  $a^3 I = I$ . Тоді система (3.1) може бути записана через складові одного вектора, наприклад  $I_a$ , з урахуванням що  $I_{a0} = I_{b0} = I_{c0}$ , тобто

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}, \\ I_b &= I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2}, \\ I_c &= I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Для визначення вектора симетричної складової нульової послідовності  $I_{a0}$  складемо почленно рівняння системи (3.2) і одержимо  $I_a + I_b + I_c = 3I_0$ , тому що  $I_{a1} + a^2 I_{a1} + a I_{a1} = 0$ ;  $I_{a2} + a I_{a2} + a^2 I_{a2} = 0$ , тобто сума трьох векторів симетричної системи дорівнює нулю. Звідки модуль і фаза вектора нульової послідовності  $I_{a0}$  дорівнює:

$$I_{a0} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}. \quad (3.3)$$

Для визначення модуля й фази вектора складовій прямій послідовності  $I_{a1}$  помножимо друге рівняння системи (3.2) на  $a$ , а третє на  $a^2$  і з обліком того, що  $a^3 I_{a1} = I_{a1}$ , а  $a^4 I_{a1} = a I_{a1}$  і одержимо:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}, \\ a I_b &= a I_0 + I_{a1} + a^2 I_{a2}, \\ a^2 I_c &= a^2 I_0 + I_{a1} + a I_{a2}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Після додавання рівнянь одержимо:  $I_a + a I_b + a^2 I_c = 3I_{a1}$ .  
Звідки модуль і фаза вектора прямої послідовності  $I_{a1}$ :

$$I_{a1} = \frac{I_a + a I_b + a^2 I_c}{3}. \quad (3.5)$$

Для визначення вектора складової зворотної послідовності  $I_{a2}$  помножимо друге рівняння в (3.2) на  $a^2$ , а третє на  $a$  й аналогічно одержимо модуль і фазу складовій вектора зворотної послідовності

$$I_{a2} = \frac{I_a + a^2 I_b + a I_c}{3}. \quad (3.6)$$

Складових векторів фаз У и С визначаються аналогічним способом.

Таким чином, для побудови захистів з пуском по симетричних складових необхідні спеціальні реле для апаратного визначення величин симетричної складових зворотної і нульової послідовності.

### 3.2. Захист зворотної послідовності

Захист застосовується на трансформаторах від зовнішніх двофазних коротких замикань, коли у фазних струмах й у напругах з'являються складові зворотної послідовності. Для їхнього виявлення використовують реле напруги РНФ-1М і реле струму РТФ-7 зворотної послідовності. Обое реле на вході містять фільтр напруги або фільтр струму симетричних складових, вихідний сигнал якого пропорційний ступеню несиметрії вхідного трифазного струму або напруги. До виходу фільтра підключене електромагнітне виконавче реле.

Схема реле напруги зворотної послідовності типу РНФ-1М показана на рис. 3.3а й містить активно-ємнісний фільтр на елементах R1C1R2C2, своїм входом підключений до вторинних обмоток трансформатора напруги TV1, а виходом – до виконавчого реле напруги KV1 типу РН-50 через випрямляч VS1. Принцип роботи схеми пояснюють векторні діаграми для випадків симетричного і несиметричного вхідних напруг (рис. 3.3б,в).

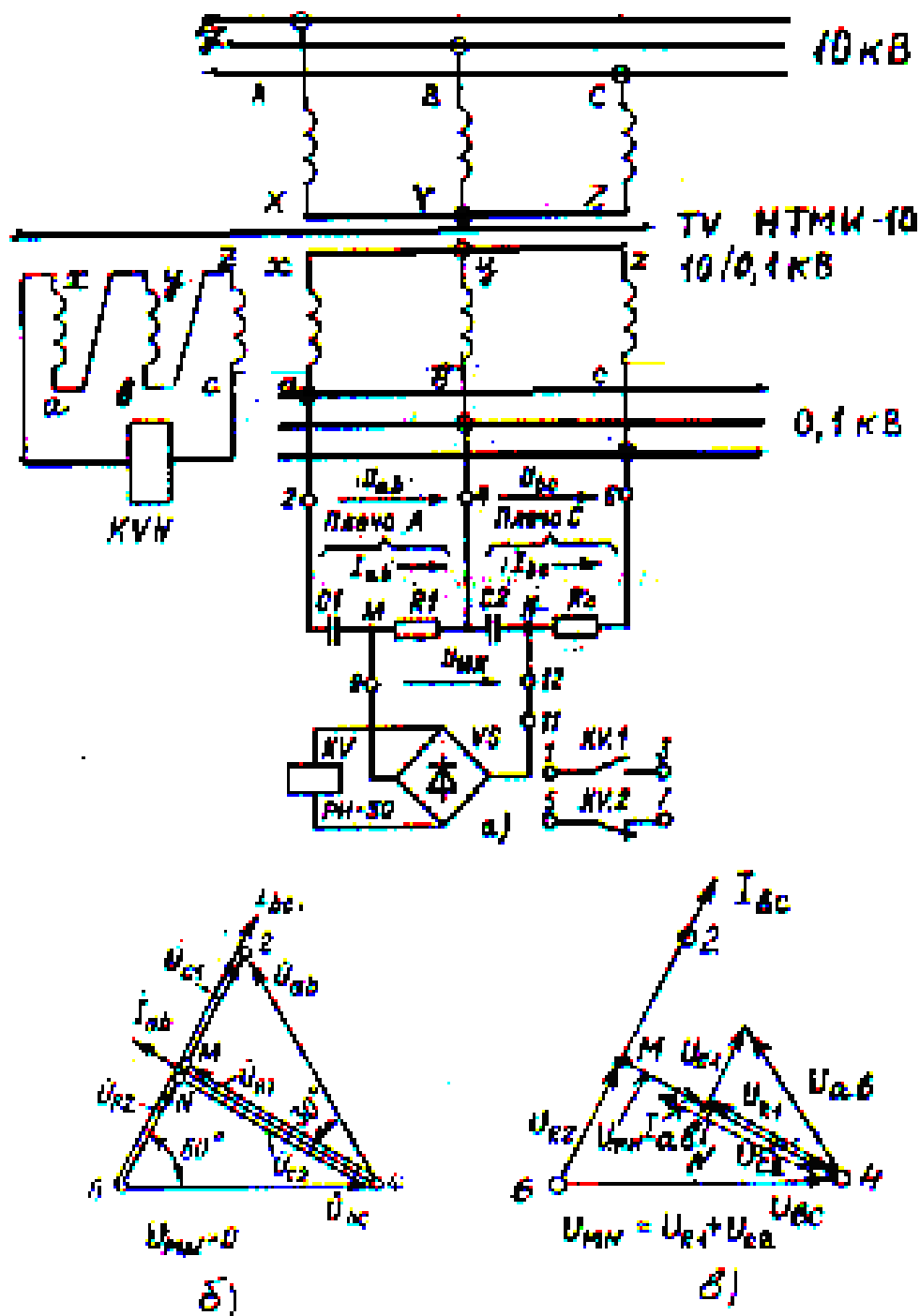


Рис. 3.3 – Реле напруги зворотної послідовності типу РНФ-1:

- а) внутрішня схема, б) векторна діаграма напруг і струмів при нормальному режимі, в) векторна діаграма напруг і струмів при короткому замиканні

Фільтр включений на лінійну напругу, тому що вони не містять напруг нульової послідовності. Тому побудову діаграм починають із векторів  $U_{ab}$  й  $U_{bc}$ . Опір резисторів й ємності конденсаторів визначається за формулами

$$R_{R1} = \sqrt{3}X_{C1}; R_{R2} = \frac{x_{C2}}{\sqrt{3}}; \frac{R_{R1}}{x_{C2}} = \frac{x_{C1}}{R_{R2}}. \quad (3.5)$$

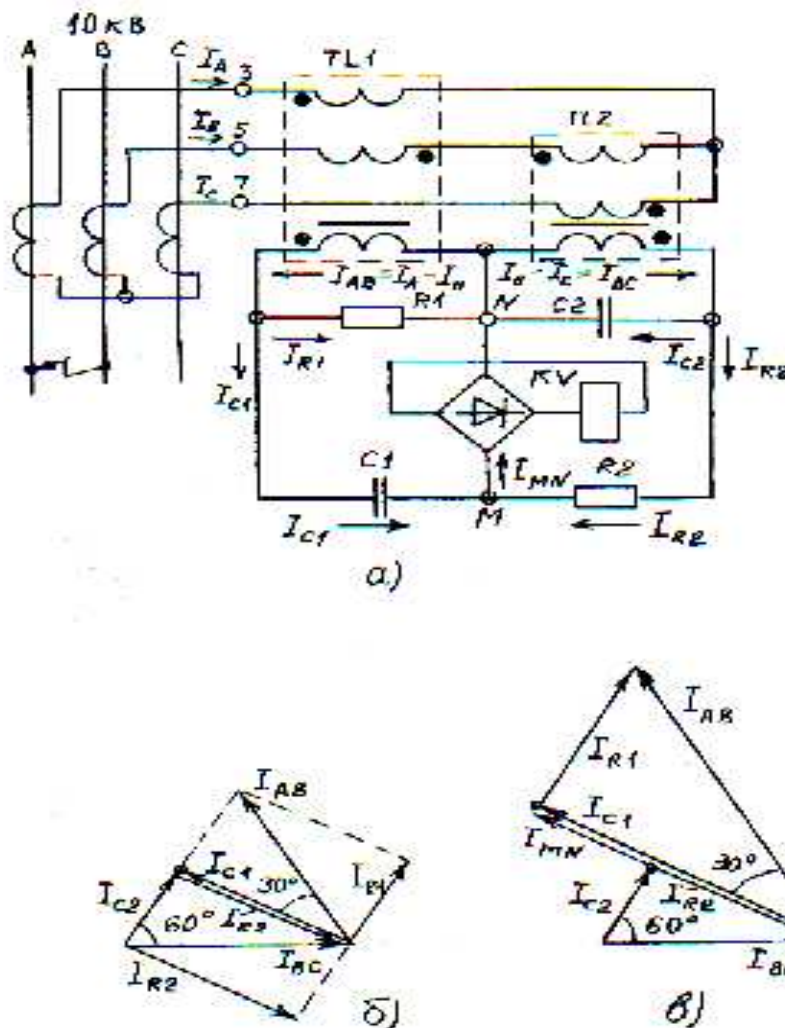
При виконанні цієї умови вектора струмів  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  випереджають напругу  $U_{ab}$  й  $U_{bc}$  відповідно на  $30^\circ$  й  $60^\circ$ . По напрямку струмів з урахуванням (3.5) будуюмо трикутники спадів напруги на  $R1C1$  й  $R2C2$ .

Вихідна напруга  $U_{mn}$  фільтра визначається як сума спадів напруг  $U_{mn} = U_{R1} + U_{C1} = I_{ab}R_{R1} + I_{bc}x_{C2}$  і, як випливає з діаграми, дорівнює нулю при симетричній системі вхідних напруг.

З появою на вході несиметрії напруг унаслідок двофазного к. з. у будь-якій комбінації, наприклад АВ, напруга  $U_{mn}$ , як випливає з векторної діаграми, приймає значення достатнє для спрацьовування реле KV1. На корпусі реле є шкала значень напруг зворотної послідовності відносно значень номіналу напруги.

Схема реле струму зворотної послідовності типу РТФ-7 показана на рис. 3.4а й містить активно-ємнісний фільтр  $R1C1R2C2$  своїм входом підключений до вторинних обмоток трансформаторів струму ТА1-ТА3, а виходом – до реле струму через випрямляч VS1. Принцип роботи схеми пояснюють векторні діаграми для випадків симетричних і несиметричних вхідних струмів (рис. 3.4б,в). Фільтр включений на лінійні струми, тому що вони не містять складових нульової послідовності. Лінійні струми отримують за рахунок проміжних трансформаторів струму ТЛА1, ТЛА2, первинні обмотки яких включені у фази АВ і ВС таким чином, що у вторинних обмотках індукуються струми  $I_{ab} = I_a - I_b$  й  $I_{bc} = I_b - I_c$ . Опір резисторів та ємності конденсаторів визначається за формулами (3.5). При цій умові вектори струмів  $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$  випереджають вектори  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$  відповідно на  $30^\circ$  й  $60^\circ$ . По напрямках струмів і з урахуванням (3.5) будуюмо трикутник векторів струмів  $I_{ab} = I_{c1} + I_{R1}$ ;  $I_{bc} = I_{R2} + I_{c2}$ .

Вихідний струм  $I_{mn}$  фільтра визначається як сума струмів  $I_{mn} = I_{R2} + I_{c1}$  дорівнює нулю при симетрії вхідних струмів, як випливає з діаграми (рис. 3.5б). З появою асиметрії струмів унаслідок двофазного КЗ струм  $I_{mn}$  збільшується і реле КА1 спрацьовує.



**Рис. 3.4 – Реле струму зворотної послідовності РТФ-7:**

а) внутрішня схема, б) векторна діаграма струмів при нормальному режимі, в) векторна діаграма струмів при короткому замиканні

### 3.3 Захист нульової послідовності

Застосовується для захисту ліній і трансформаторів від однофазних замикань на землю. У мережах із глухозаземленою нейтраллю захист діє на відключення, а в мережах з ізольованою нейтраллю - на сигналізацію для оперативного персоналу.

Принцип дії захисту заснований на геометричному підсумовуванні фазних струмів або напруг. При симетричних режимах і при двофазних к. з. їхня сума  $3I_0=0$ ;  $3U_0=0$  дорівнює нулю, а при однофазних к. з. їхня сума більше нуля і захист спрацьовує. Схеми й векторні діаграми, що пояснюють принцип дії захисту показані на рис. 3.5 й 3.6.

У мережах напруги 10 кВ з ізольованою нейтраллю при однофазному замиканні на землю первинні обмотки трансформатора напруги неушкоджених

фаз виявляються під лінійною напругою, тому номінальна напруга їхніх вторинних обмоток  $U_{2ном} = \frac{100}{\sqrt{3}}$  В.

При неметалічному замиканні на землю, тобто через перехідний опір, напруга ушкодженої фази щодо землі більше нуля, а напруга неушкодженої фази менше лінійної. Напруга ізольованої нейтралі щодо землі при цьому менша фазної, котра оцінюється коефіцієнтом замикання на землю  $K_N = U_N / U_\Phi$ .

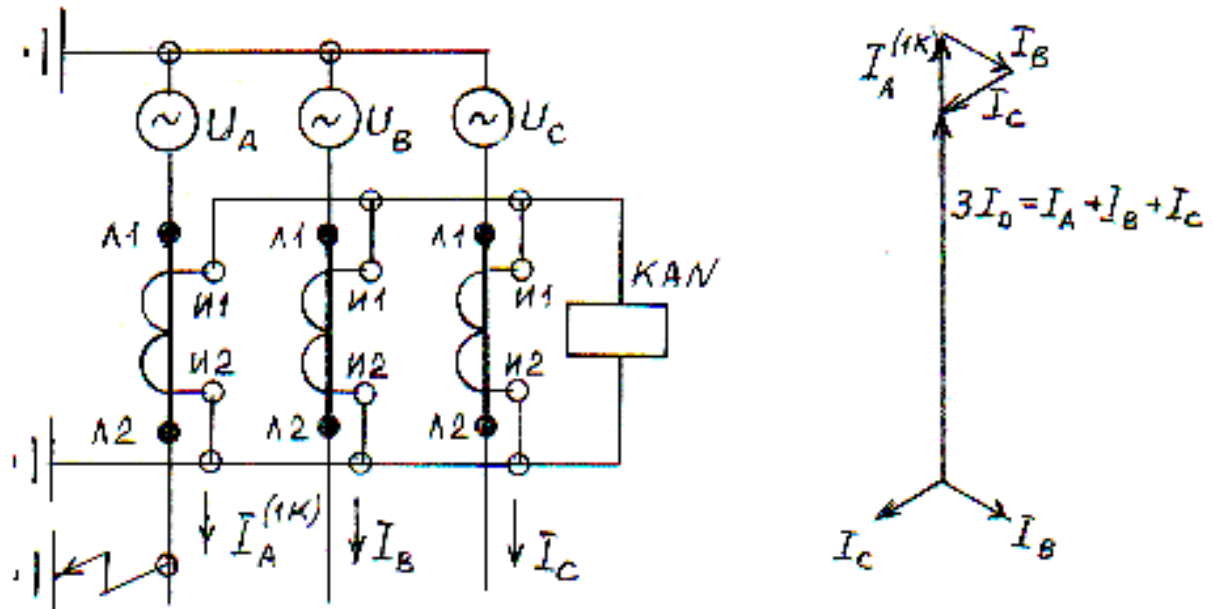


Рис. 3.5 – Схема струмового захисту нульової послідовності та векторна діаграма при однофазному к.з.

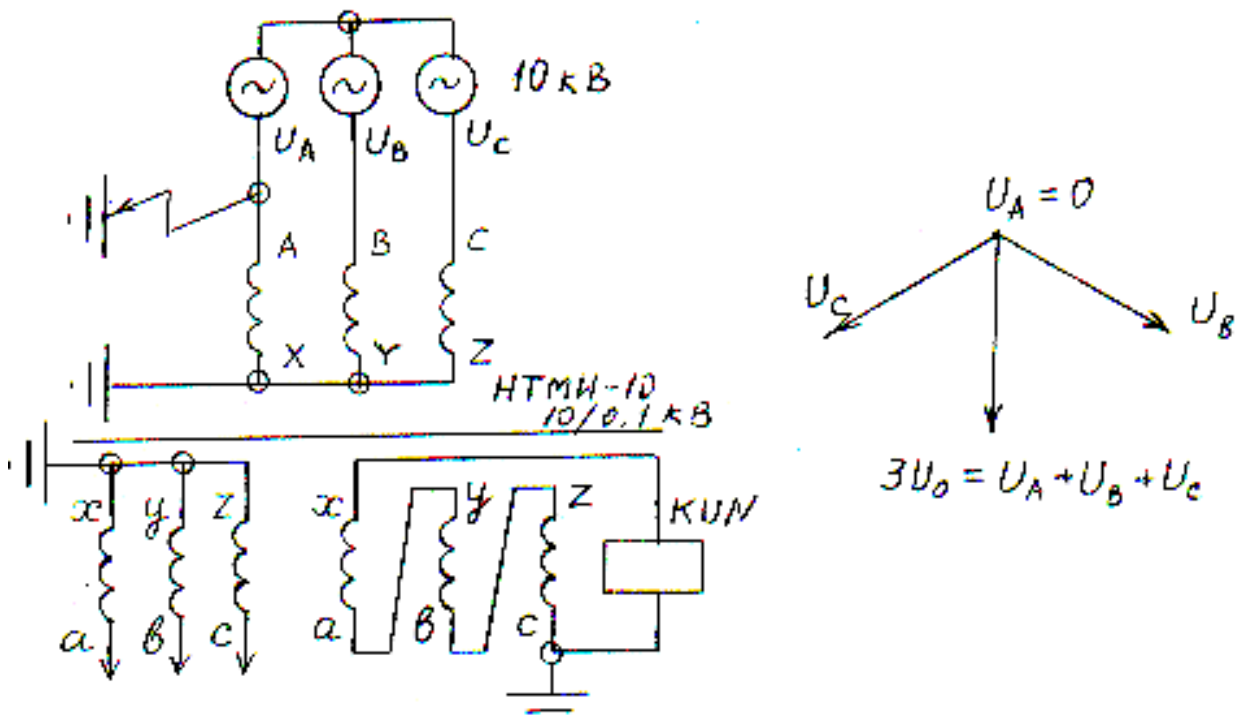


Рис. 3.6 – Схема захисту напруги нульової послідовності та векторна діаграма при однофазному к.з.



## 4.2. Реле напрямку потужності

Конструкція індукційного реле напрямку потужності серії РБМ-170 (РБМ-270) показана на рис. 4.2. Магнітопровід 1, набраний з лакованих сталених пластин, має чотири виступаючі полюси. Між полюсами для зменшення опору магнітному потоку розташований нерухомий сталевий сердечник 2. У повітряний зазор, утворений полюсами й сердечником, міститься рухливий елемент реле - алюмінієвий циліндр 3 (барабанчик), що повертається навколо осі. Обмотка струму реле складається із двох секцій 5, розташованих на протилежних полюсах. Секції з'єднані послідовно. Обмотка струму живиться від трансформатора струму, встановленого в колі лінії. Обмотка напруги реле виконується із чотирьох секцій 4, з'єднаних послідовно й живиться від трансформатора напруги. Секції розташовані на ярмі. Таке розташування в порівнянні з розташуванням обмотки на полюсах дозволяє збільшити загальне число витків обмотки. Це приводить до збільшення магніторушійної сили і потоку, а отже і до підвищення чутливості реле.

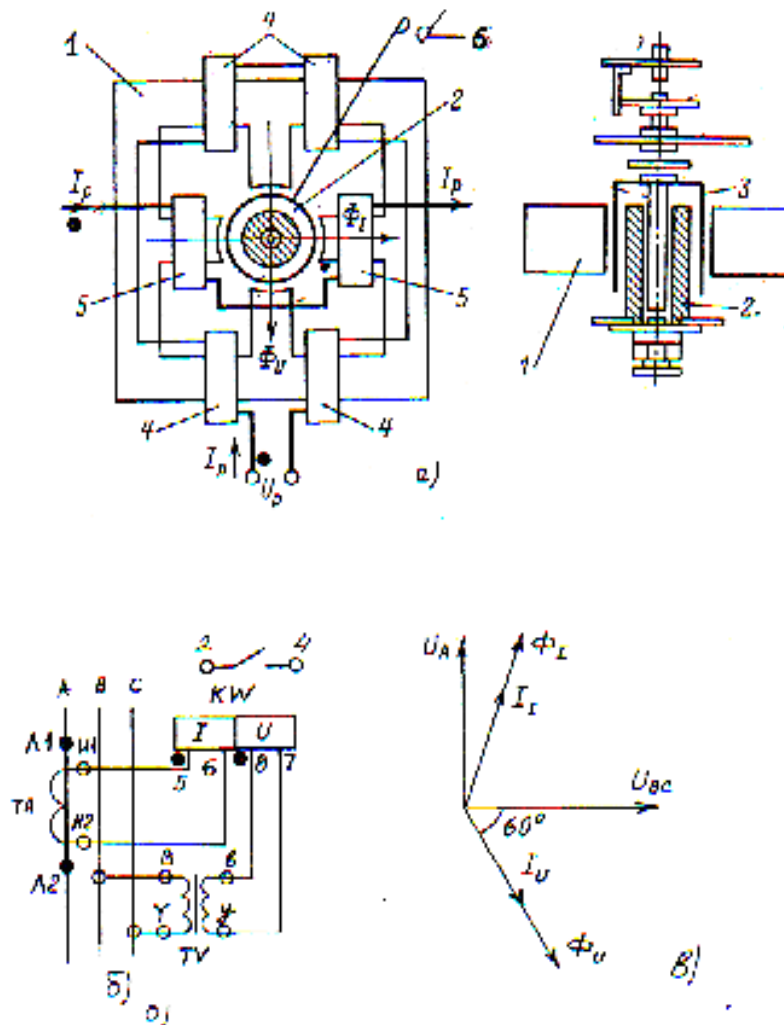


Рис. 4.2 – Реле напрямку потужності типу РБМ-170:

- а) конструкція, б) схема підключення,  
в) векторна діаграма струмів, напруг і магнітних потоків



Реле напрямку потужності залежно від призначення можуть мати один або два контакти. Перші використовуються в схемах струмових спрямованих захистів для визначення знака потужності при к.з. (реле типів РБМ-171, РБМ-177, РБМ-178), другі - у схемах поперечних диференціальних струмових спрямованих захистів паралельних ліній для визначення ушкодженої лінії (реле типів РБМ-271, РБМ-277, РБМ-278).

Принцип дії реле аналогічний принципу дії асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Струми в струмовій котушці й у котушці напруги створюють магнітні потоки  $\Phi_I$  і  $\Phi_U$  зсунуті конструктивно в просторі (рис. 4.2а) і в часі (рис. 4.2б). З'являється обертове магнітне поле з моментами  $M=k\Phi_I\Phi_U\sin(\Phi_I^{\wedge}\Phi_U)$ , барабанчик повертається й замикає контакт б.

Схема підключення реле показана на рис. 4.2б. Струмова котушка включається у фазу А через трансформатор струму ТА. Котушка напруги реле підключається до трансформатора TV напруги, первинна обмотка якого включена на лінійну напругу фаз ВС. Реле спрацьовує при протіканні струму фази А від клемми Л1 до Л2 трансформатора струму ТА і не спрацьовує при зворотному напрямку протікання струму.

## 5. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ

### 5.1. Електромагнітні процеси в трансформаторах

Конструкція трансформатора показана на рис. 5.1. При включенні первинної обмотки під напругу  $U_1$  з'являється струм  $I_1$ , що відповідно до закону повного струму одержимо:

$$I_1 W_1 = Hl; H = B / \mu \mu_0; B = \Phi_1 / S_c, \quad (5.1)$$

створює магнітний потік

$$\Phi_1 = \frac{\mu \mu_0 S_c I_1 W_1}{l}, \quad (5.2)$$

де  $I_1 W_1$  — струм і кількість витків первинної обмотки;

$Hl$  — напруженість і довжина магнітної силової лінії;

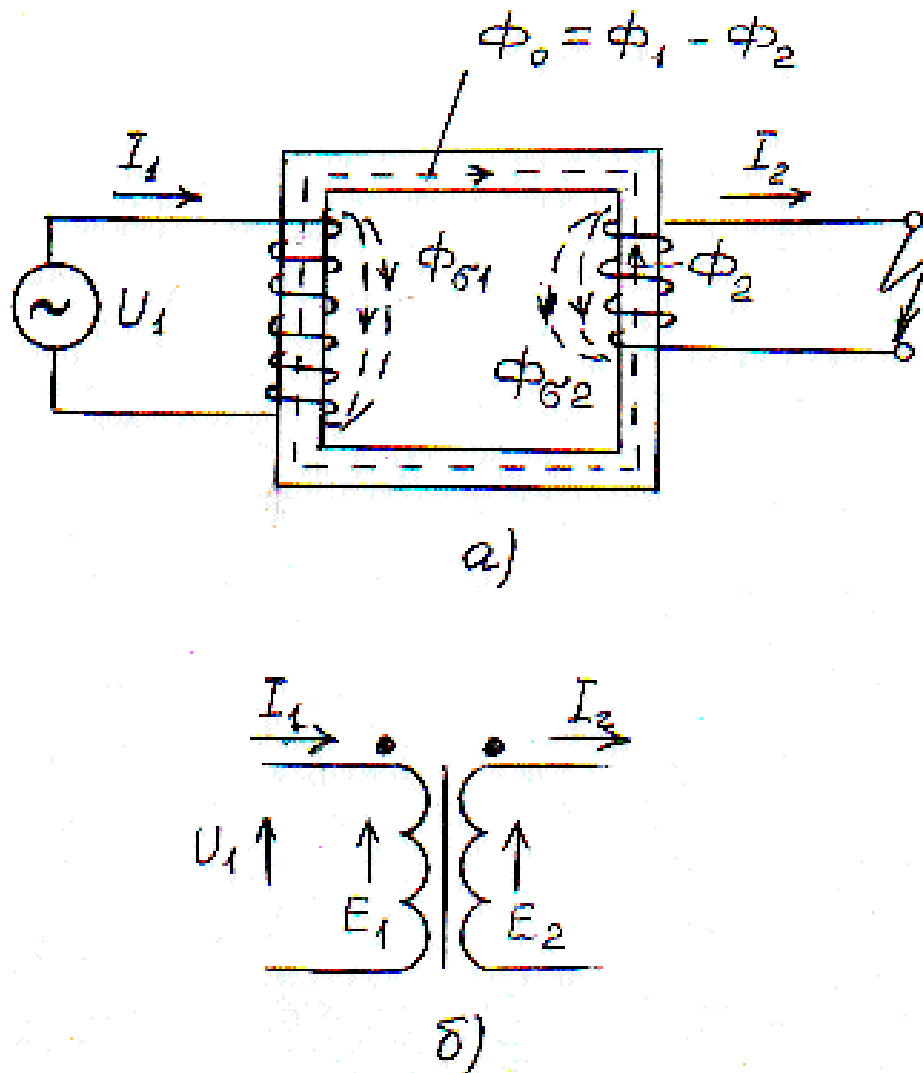
$B$  — магнітна індукція як щільність магнітного потоку в осерді перетином  $S_c$ ;

$\mu_0, \mu$  — абсолютна і відносна магнітна проникність.

Для зручності аналізу потік розкладають на дві складові: 1) потік  $\Phi_0$ , що протікає по сталевому осерддю і 2) потік  $\Phi_{\sigma 1}$  розсіювання, що протікає по повітрю, як показано на рис.5.1.

Відповідно до закону Фарадея відповідні потоки створюють ЕРС самоіндукції: головну  $e_1 = W_1 d\Phi_0 / dt$  і розсіювання  $e_1 = W_{1\sigma} d\Phi_0 / dt$ , спрямовані відповідно до закону Ленца зустрічно ЕРС  $U_1$  джерела живлення. Діючі

значення рівні  $E_1 = \omega W_1 \Phi_0$  і  $E_{1\sigma} = \omega W_1 \Phi_{1\sigma}$ ,  $\omega = 2\pi f = 314$  рад/сек — колова частота.



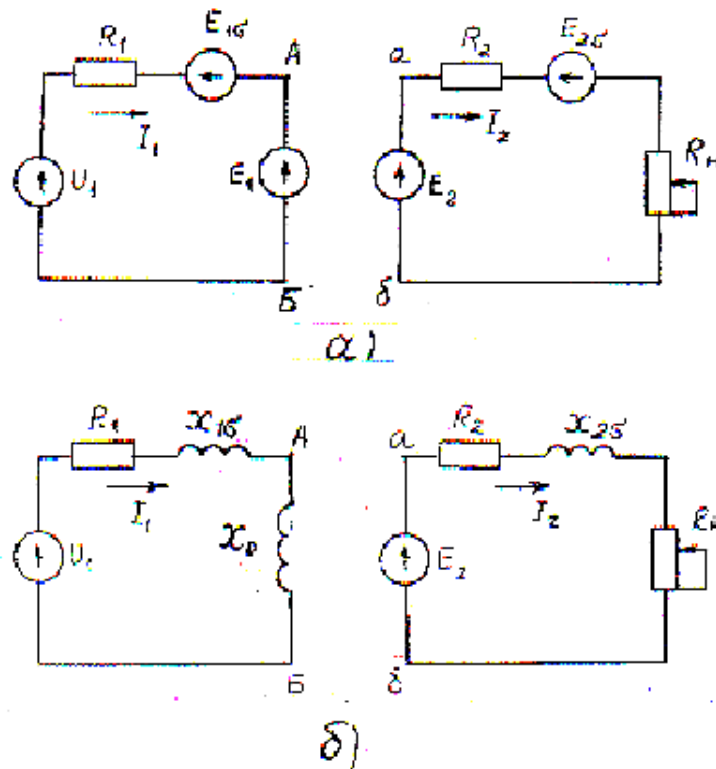
**Рис. 5.1 – Трансформатор:**  
а) конструкція; б) електрична схема

Згідно з другим законом Кірхгофа рівняння електричної рівноваги первинного кола трансформатора (рис. 5.2а) і величина первинного струму  $I_1$  дорівнюють:

$$U_1 - E_0 - E_{1\sigma} = I_1 R_1; \quad I_1 = \frac{U_1 - E_0 - E_{1\sigma}}{R_1}. \quad (5.3)$$

Для зручності розрахунків за законом Ома вплив ЕРС на величину струму в (5.3) замінюють індуктивними опорами. Для цього вводять коефіцієнт  $L$  індуктивності для переходу від операцій над магнітними потоками до операцій над струмами, тобто

$$E = \omega W \Phi = \omega L I; \quad I = \frac{E}{\omega L} = \frac{E}{X_L}. \quad (5.4)$$



**Рис. 5.2 – Схема заміщення трансформатора:**  
а) за 2-им законом Кірхгофа; б) з індуктивними опорами

Тоді схема первинного кола трансформатора перетвориться до виду, показаному на рис. 5.2б), а рівняння (5.3) – до виду:

$$U_1 = I_1 R_1 + I_1 (X_0 + X_{1\sigma}); I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_0 + X_{1\sigma})^2}}, \quad (5.5)$$

де  $R_1$  — активний опір первинної обмотки;  
 $x_0, x_{1\sigma}$  — індуктивні опори.

Основний потік у осерді відповідно до закону Фарадея створює у вторинній обмотці трансформатора ЕРС взаємоіндукції:

$$e_2 = W_2 \frac{d\Phi_0}{dt}; E_2 = \omega W_2 \Phi_0, \quad (5.6)$$

де  $W_2$  — кількість витків вторинної обмотки.

ЕРС самоіндукції первинної обмотки і ЕРС взаємоіндукції вторинної обмотки створені основним потоком, тому мають однаковий напрямок від кінця котушки в її початок, як показано на рис.5.1б.

При підключенні до вторинної обмотки навантаження з'являється струм  $I_2$ , що збігається за напрямком з ЕРС взаємоіндукції  $E_2$ , тобто витікає з її початку. При цьому первинний струм втікає в початок первинної котушки (рис. 5.1б), тобто струми в обмотках знаходяться у протифазі.

Струм  $I_2$  створює аналогічно струму  $I_1$  дві складових магнітного потоку (рис. 5.1а): потік  $\Phi_{2\sigma}$  розсіювання, що протікає по повітрю і потік  $\Phi_2$  у осерді трансформатора, спрямований назустріч потокові  $\Phi_1$  первинної обмотки, тому що струм  $I_2$  тече назустріч  $I_1$ . Основний потік  $\Phi_0$  у осерді як різниця  $\Phi_1 - \Phi_2$  і, отже, ЕРС самоіндукції  $E_1$  при цьому зменшується. Згідно з (5.3) струм у

первинній обмотці  $I_1$  росте і отже ростуть  $\Phi_0$  і  $E_0$  до початкових значень, при яких відновлюється рівняння електричної рівноваги (5.3). Таким чином, основний магнітний потік у осерді завдяки негативному зворотному зв'язку, реалізована через  $E_0$ , залишається стабільним. На цій підставі на рис. 5.3 показана функціональна схема трансформатора як системи автоматичної стабілізації основного магнітного потоку.

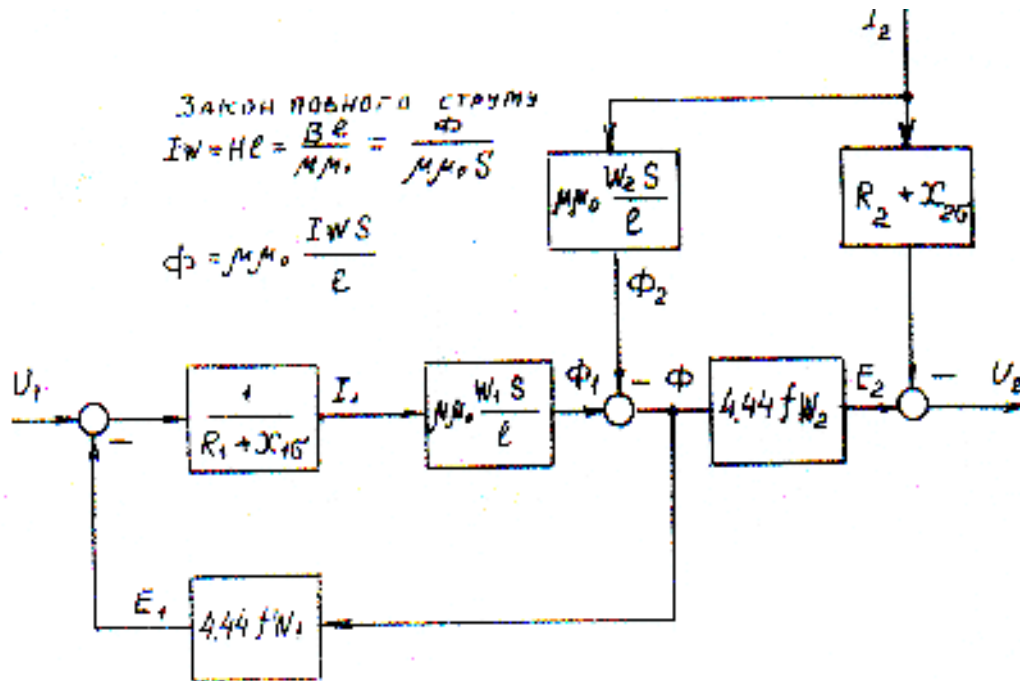


Рис. 5.3 – Схема трансформатора як системи автоматичної стабілізації магнітного потоку

## 5.2 . Розрахунок струмових режимів трансформаторів

Розрахунок струмових режимів трансформатора необхідний для визначення уставок спрацьовування захистів. Номінальні струми і максимальні 5-годинні струми перевантажень рівні

$$I_{BH}^{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{BH}^{ном}}; \quad I_{HH}^{ном} = K_T I_{BH}^{ном}; \quad I_{BH}^{макс} = 1,4 I_{BH}^{ном}. \quad (5.7)$$

Для розрахунку струмів в обмотках трансформатора при коротких замиканнях на виводах вторинної обмотки використовують схему заміщення мережі з трансформатором (рис. 5.4). Схеми заміщення різних типів трансформаторів приведені на рис. 5.5.

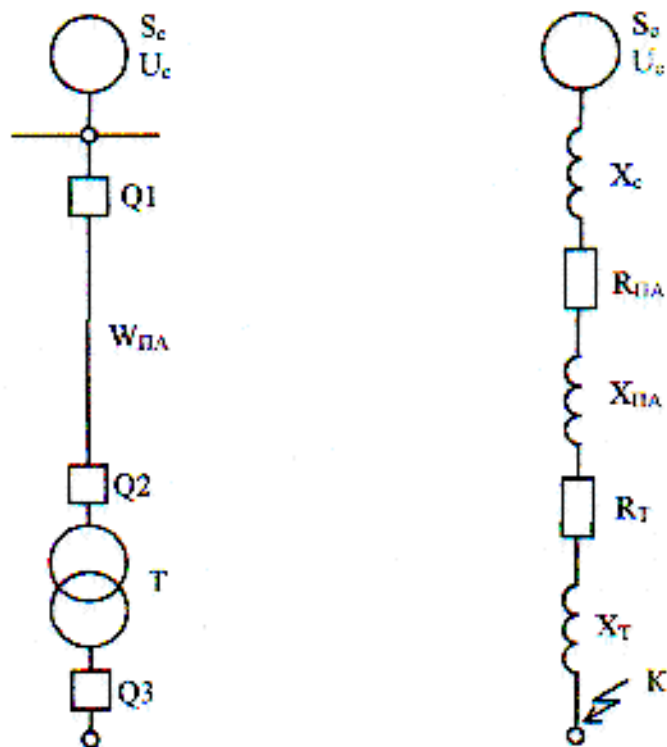


Рис. 5.4 – Схема заміщення мережі з трансформатором для розрахунку струмів коротких замикань

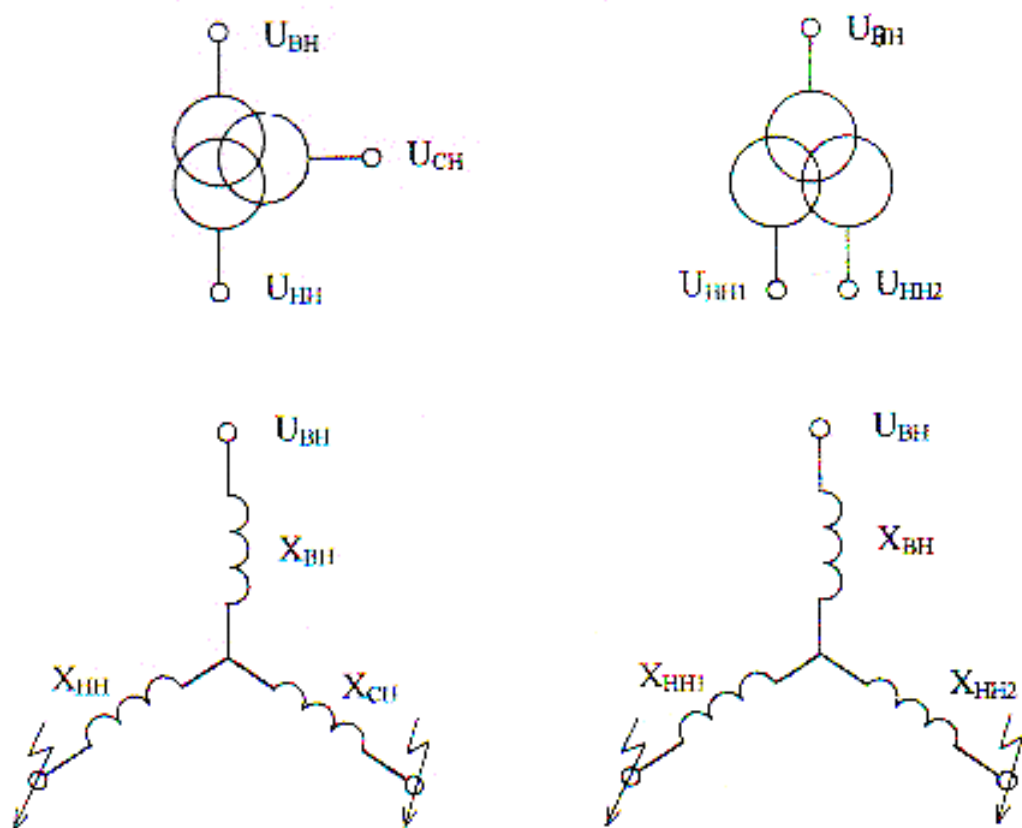


Рис. 5.5- Схеми заміщення трансформатора з розщепленими обмотками та три обмоткового

Для електричного з'єднання кіл первинної і вторинної обмоток (рис.5.2а) необхідно параметри вторинного кола привести до високої первинної напруги на основі збереження при цьому вторинної потужності. При цьому приведення відбувається через коефіцієнт  $K_T$  трансформації трансформатора. Для приведення вторинних опорів необхідно помножити реальні опори вторинного кола  $R_2'' = R_2 \cdot K_T^2$ ,  $X_{2\sigma}'' = X_{2\sigma} \cdot K_T^2$ , а приведений струм при цьому зменшиться  $I_2'' = I_2 / K_T$ .

Параметри схеми заміщення одержують з наступних паспортних даних трансформатора: 1) потужність  $S$ ; 2) лінійні напруги обмоток високого  $U_{ВН}$  і низького  $U_{НН}$  напруг; 3) напруга  $U_K$  % короткого замикання у відсотках від  $U_{ВН}$ , тобто напруга підведена до обмотки ВН при короткозамкнутій обмотці НН, при якому струми в обмотках дорівнюють номінальним значенням; 4) активна потужність  $P_K$  внутрішніх втрат у трансформаторі при трифазному к. з. обмотки НН. Повний, активний і реактивний опори схеми заміщення однієї фази трансформатора в режимі к.з. дорівнюють:

$$Z_T = \frac{u_K \% U_{ВН}^2 [кВ]}{100S [МВА]}; R_T = R_1 + R_2'' = \frac{P_K}{3I_{ВН}^2};$$

$$X_T = X_1 + X_{2\sigma}'' = \sqrt{Z_T^2 - (R_1 + R_2'')^2}.$$
(5.7а)

Для трансформаторів потужністю  $S \geq 6300$  кВА; сума активних опорів обмоток дорівнює  $R_1 + R_2'' = 0,1(X_{1\sigma} + X_{2\sigma}'')$ , тому приймають, що в режимі к. з. повний опір дорівнює  $Z_T = X_T$ .

Триобмотковий трансформатор у режимі к. з. представляється трипроменевою схемою заміщення (рис. 5.5) тільки з індуктивними опорами розсіювання, тобто  $Z_T = X_T$  (їхня потужність завжди  $S > 6300$  кВА), які визначаються за формулами

$$X_{ВН} = 0,5(X_{ВН-СН} + X_{ВН-НН} - X_{СН-НН});$$

$$X_{СН} = 0,5(X_{ВН-СН} + X_{СН-НН} - X_{ВН-НН});$$

$$X_{НН} = 0,5(X_{ВН-НН} + X_{СН-НН} - X_{ВН-СН}).$$
(5.8)

У формулах (1.8) опори  $X_{ВН-СН}$ ,  $X_{ВН-НН}$ ,  $X_{СН-НН}$  обчислюються за першою формулою з (1.7а) за відповідними довідковими значеннями напруг коротких замикань  $U_{К.ВН-СН}$ ,  $U_{К.ВН-НН}$ ,  $U_{К.СН-НН}$ . Результируючий опір трансформатора в режимі к. з. на стороні СН або НН дорівнює сумі опорів відповідних променів схеми заміщення (рис. 5.5).

Трансформатори з розщепленою обмоткою НН представляють трипроменевою схемою заміщення (рис. 5.5 в), у якій один промінь відповідає обмотці ВН, а два інших — розщепленій обмотці НН. Остання складається з двох обмоток НН1 і НН2, потужність кожної з яких дорівнює половині

потужності обмотки ВН. Індуктивні опори променів схеми заміщення для практичних розрахунків обчислюються за емпіричними формулами:

$$X_{BH} = 0,125X_{BH-HH}; X_{H1} = X_{H2} = 1,75X_{BH-HH}, \quad (5.9)$$

де  $X_{BH-HH}$  — індуктивний опір трансформатора при паралельному з'єднанні розщеплених обмоток, величина якого визначається за першою з формул (1.7а). Паспортне значення напруги короткого замикання вказується для випадку паралельного з'єднання розщеплених обмоток. Результуючий опір трансформатора при к. з. на одній з обмоток дорівнює  $X_T = X_{BH} + X_{HH1}$ .

Струми в обмотках ВН і НН при трифазному к. з. на виводах вторинної обмотки розраховують за схемою заміщення (рис.5.4) і дорівнюють:

$$I_{BH}^{(3K)} = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3} \sum Z}; I_{HH}^{(3K)} = I_{BH}^{(3K)} \cdot K_T, \quad (5.10)$$

де  $\sum Z = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + (X_C + X_{\Sigma} + X_T)^2}$  — результуючий опір схеми заміщення в режимі к. з.;

$R_{\Sigma}$ ,  $X_{\Sigma}$ ,  $X_T$  — активний і індуктивний опори повітряної лінії і трансформатора;

$X_C$  — опір енергосистеми;  $X_C = U_C^2 [kB] / S_C [MVA]$ , де  $U_C = 110$  кВ,  $S_C$  -напруга і потужність однієї або більше підстанцій енергосистеми напругою 330/110 кВ.

Струм в обмотках трансформатора при двофазному к. з.  $I_{BH}^{(2K)} = \sqrt{3} I_{BH}^{(3K)} / 2$ .

При однофазних к. з. струми в обмотках розраховують методом симетричних складових, котрі в колах ушкодженої фази і нейтралі рівні:

$$I_{BH.пов.}^{1K} = 2I_{BH}^{3K} / 3. \quad (5.10a)$$

Для неушкодженої фази  $I_{BH.непов.}^{1K} = 2I_{BH}^{3K} / 3$ .

Термічна стійкість трансформатора — припустимий інтервал часу роботи трансформатора в режимі к. з. визначається за формулою  $t = 500 / K_{кр}^2$  в сек., де  $K_{кр} = I_{BH}^{3K} / I_{BH}^{НОМ}$  — коефіцієнт кратності струму. Час спрацьовування захисту повинний бути меншим часу термостійкості  $t_{сп} < t_{ТС}$ . Якщо розрахункова термічна стійкість перевищує 3 сек, то приймається  $t_{ТС} = 3$  сек.

При включенні трансформатора під напругу з'являються протягом 0,1 сек. кидки струму з імовірністю 0,5, величина яких може викликати помилкове спрацьовування струмового захисту. Причина появи кидка струму при включенні трансформатора зв'язана з явищем короточасного магнітного насичення осердя в момент включення. Після відключення трансформатора від джерела його осердя з імовірністю 0,5 залишається намагніченим з величиною залишкового потоку  $\Phi_{ост.}$  згідно з кривою намагнічування (рис. 5.6).



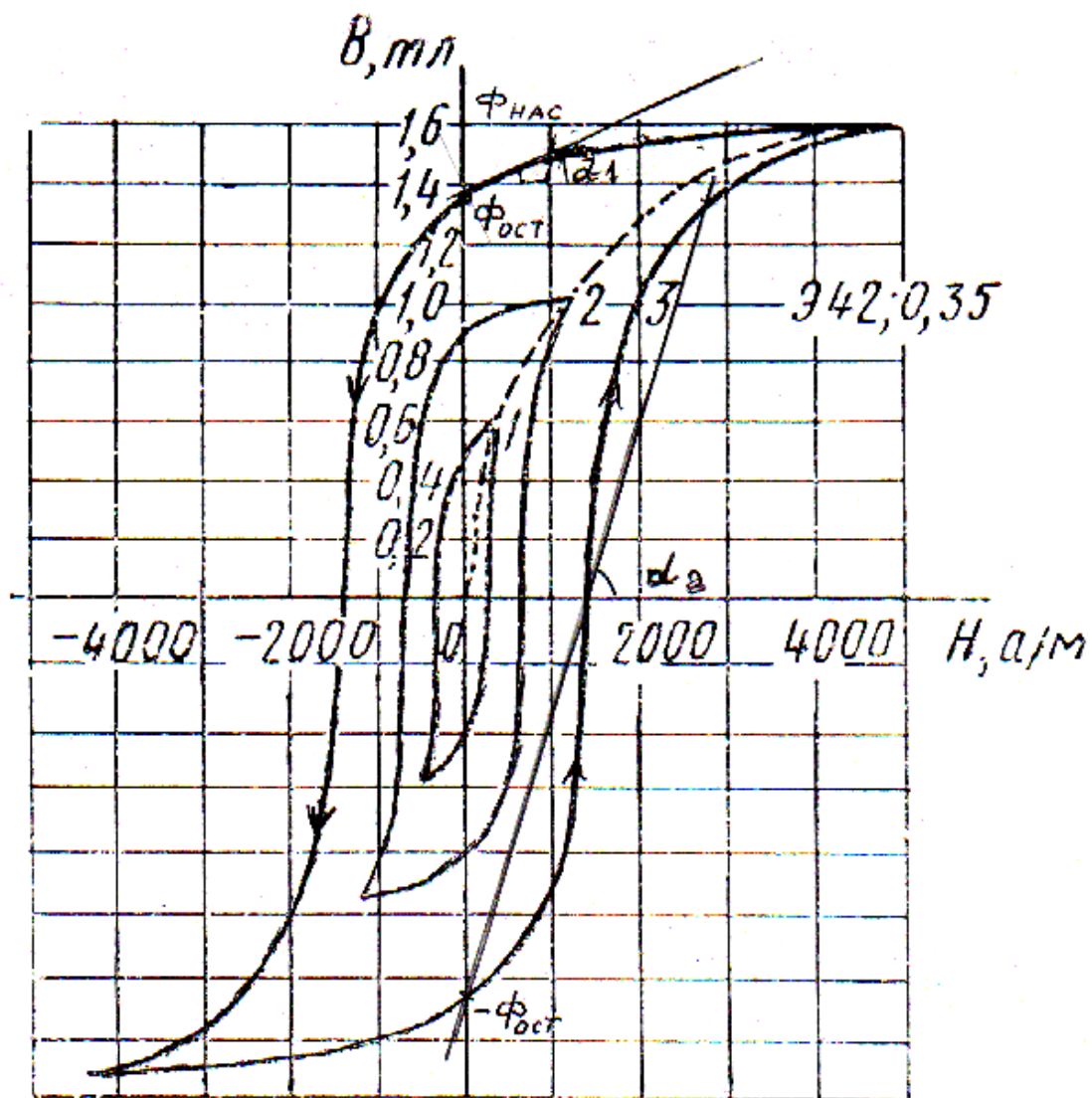


Рис. 5.6- Крива намагнічування осердя трансформатора

Величина ЕРС самоіндукції первинної обмотки, що з'являється при початковій фазі 90 градусів включення під напругу джерела залежить від знака залишкового потоку  $\Phi_{ост}$  у осерді. Якщо в момент включення трансформатора знак напруги джерела і знак  $\Phi_{ост}$  збігаються, то ЕРС самоіндукції:

$$e_1 = W_1 \frac{d(\Phi_{ост} - \Phi_{нас})}{dt} = W_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = W_1 \operatorname{tg} \alpha_1, \quad (5.11)$$

де  $\operatorname{tg} \alpha_1$  — величина похідної функції магнітного потоку в геометричному змісті при включенні трансформатора.

Якщо в момент включення трансформатора знак напруги і знак  $\Phi_{ост}$  протилежні, ЕРС самоіндукції згідно з рис.5.6 дорівнює  $e_2 = W_1 \operatorname{tg} \alpha_2$ .

Величина кидка струму в першому випадку при включенні дорівнює  $I_{Б1} = (U - e_1)/R_1$  і в другому випадку дорівнює  $I_{Б2} = (U - e_2)/R_1$ . Таким чином, кидки струму пропорційні  $\operatorname{tg} \alpha$ . Тоді кидок струму холостого ходу буде

$$\frac{I_{Б}}{I_{ном}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{\operatorname{tg} 75}{\operatorname{tg} 25} = 8,15.$$

Величину кидка струму можна також оцінити за схемою заміщення (рис. 5.2.б), якщо допустити насичення сердечника. При цьому опір намагнічування  $X_0 = 0$ , а є тільки опір розсіювання  $X_{1\sigma}$ , тому що потоки розсіювання замикаються по повітрю і не насичуються. З урахуванням того, що  $X_{1\sigma} = 0,05X_0$ ,  $I_{BH}^{HOM} = 10I_{XX}$ , то  $I_B = 20I_{XX} = 2I_{BH}^{HOM}$ .

### 5.3. Вибір типів захистів трансформатора

Згідно з вимогами «Правил улаштування електроустановок ПУЕ» для трансформаторів передбачені захисти від наступних видів ушкоджень і ненормальних режимів:

- 1) міжфазних внутрішніх к. з. в обмотках і на їхніх виводах;
- 2) однофазних к. з. струмоведучих частин на металеві частини трансформатора, з'єднані з «землею»;
- 3) міжвиткових к. з. в обмотках;
- 4) струмів перевантаження більше 140%, у тому числі викликаних зовнішніми к. з. на лініях, що відходять;
- 5) зниження рівня охолоджувального масла.

Вибір типів захистів залежить від потужності трансформатора і напруги обмотки ВН. Для захисту від міжфазних внутрішніх к. з. при потужності  $S < 1000$  кВА застосовують запобіжники. При потужності  $1000 < S < 4000$  кВА застосовують струмову відсічку без витримки часу, але якщо коефіцієнт чутливості відсічки  $K_{чувст} < 2$ , а також при паралельній роботі трансформаторів застосовують диференціальний захист. При потужності  $S > 6300$  кВА застосовують обов'язково диференціальний захист.

Для захисту від зовнішніх одно- і двофазних к. з. застосовують обов'язково при потужності  $400 < S < 4000$  кВА максимальний струмовий захист із витримкою часу, а при  $S > 6300$  кВА максимальний струмовий захист нульової і зворотної послідовності з витримкою часу.

Для захисту від міжвиткових к. з. в обмотках і зниження рівня масла застосовують газовий захист.

Для захисту від струмів перевантаження, у тому числі від трифазних зовнішніх к. з. застосовують максимальний струмовий захист із витримкою часу, що діє на сигналізацію для оперативного персоналу. Будова і принцип дії перерахованих вище захистів розглядаються в розділах 2 і 3.

## 6. ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Згідно з вимогами ПУЕ диференціальний захист є основним захистом від внутрішніх к. з. і встановлюється обов'язково на трансформаторах потужністю 6300 кВА і більш, а також на трансформаторах потужністю 1000-4000 кВА при їхній паралельній роботі.

## 6.1. Принцип дії диференціального захисту

Принцип дії диференціального захисту пояснюється її схемою, що надана на рис. 6.1. Схема містить трансформатори струму ТАВН і ТАНН на сторонах обмоток ВН і НН, і реле струму КА1. Вторинні обмотки ТАВН, ТАНН і котушка реле КА1 з'єднані між собою за схемою «вісімки», тобто вторинні струми ТАВН, ТАНН через котушку реле КА1 протікають зустрічно, тобто віднімаються і через котушку КА1 протікає різниця вторинних струмів. Трансформатори струму ТАВН і ТАНН повинні мати такі коефіцієнти трансформації, щоб їхні вторинні струми були рівні. Тоді в нормальному режимі роботи трансформатора і при зовнішніх к. з. за трансформатором (точка К2 на рис. 6.1.) різниця струмів у котушці КА1 дорівнює нулю і реле не спрацьовує. На практиці неможливо підібрати трансформатори струму ТАВН і ТАНН з такими коефіцієнтами трансформації, щоб їхні вторинні струми були рівні між собою. У зв'язку з цим у нормальному режимі й у режимі зовнішнього к. з. різниця вторинних струмів не дорівнює нулю, тобто має місце так званий струм небалансу  $I_{\text{НБ}} = I_{2\text{ТАВН}} - I_{2\text{ТАНН}} > 0$ . Для того, щоб не було помилкового спрацьовування захисту, його уставка спрацьовування визначається за формулою  $I_{\text{сп}} = 1,2I_{\text{НБ}}$ .

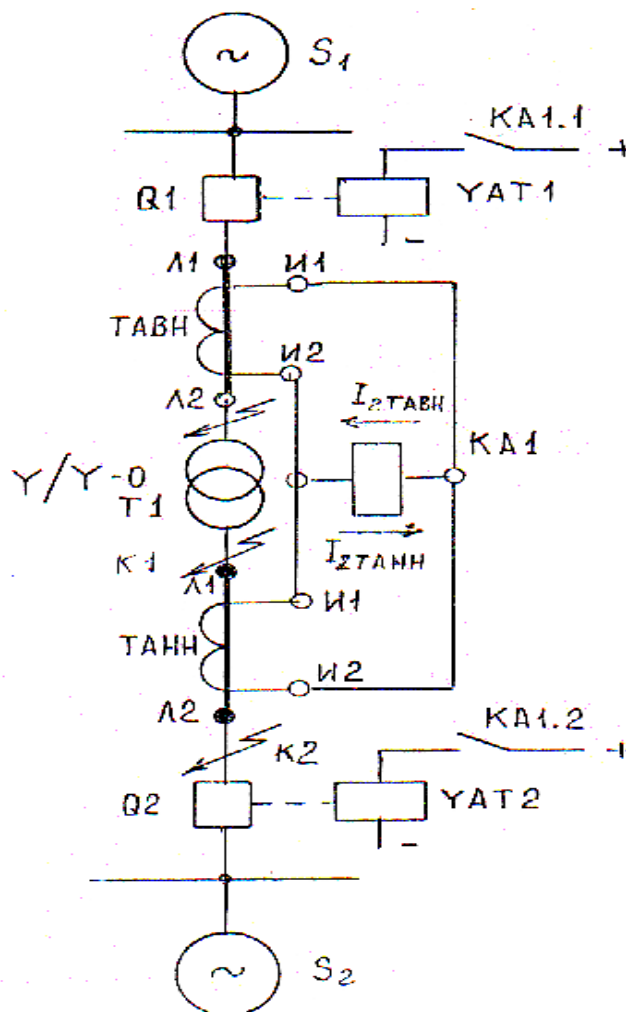
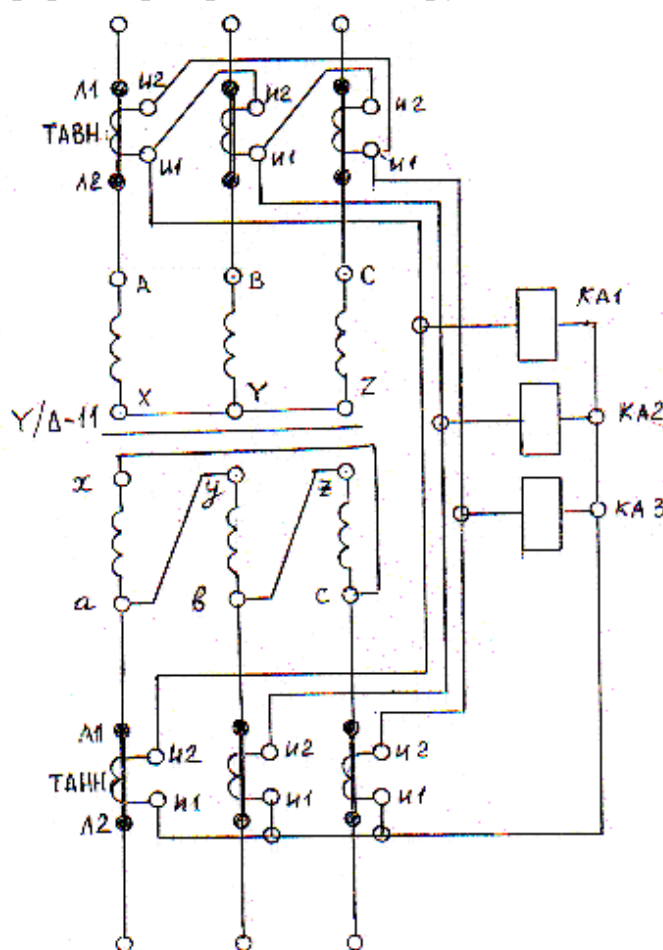


Рис. 6.1 – Схема диференціального захисту

При внутрішньому к. з. у зоні між ТАВН і ТАНН (точка К1 на рис. 6.1.) вторинний струм від ТАНН дорівнює нулю при односторонньому живленні або змінює напрямок, тобто складається з вторинним струмом від ТАВН при паралельній роботі трансформаторів. У обох випадках через котушку реле КА1 протікає струм і воно спрацьовує.

Усе вищевикладене справедливо для трифазних трансформаторів із групою з'єднання обмоток «зірка-зірка-нуль», первинні і вторинні струми яких збігаються за фазою. Однак трансформатори з напругою 110/10 кВ найчастіше мають групу з'єднання обмоток «зірка-трикутник-11», первинні і вторинні струми яких мають фазовий зсув тридцять градусів. Це приводить до подальшого збільшення струму небалансу, до завищення уставки спрацьовування реле КА1, до зменшення коефіцієнта чутливості захисту і до відключення трансформатора при великих струмах к. з.



**Рис. 6.2- Схема диференціального захисту трансформатора з групою обмоток «зірка-трикутник-одинадцять»**

Для компенсації впливу фазового зсуву на струм небалансу вторинні обмотки ТАВН і ТАНН з'єднують у схему протилежну схемі з'єднання обмоток ВН і НН трансформатора як показано на рис 6.2. При цьому вторинні струми ТАВН і ТАНН мають фазовий зсув 180 градусів (у протифазі) і, отже, у котушках реле струми віднімаються. Такі схеми використовують на трансформаторах потужністю 1-4 МВА.

## 6.2. Диференціальний захист на основі реле РНТ-565

Для побудови диференціального захисту трансформаторів потужністю 6-16 МВА використовують спеціальне диференціальне реле типу РНТ-565. Реле забезпечує зменшення струму небалансу, уставки спрацьовування і захисне відключення трансформатора при менших значеннях струмів к. з.

Конструкція реле і його внутрішня електрична схема показана на рис. 6.3. Реле містить проміжний трансформатор струму ПТТ із трьома первинними обмотками (диференціальна і дві зрівняльних) і двома вторинними обмотками: короткозамкнута для компенсації впливу кидків струму при включенні трансформатора під напругу і робочу обмотку, до якої підключене виконавче реле КА струму типу РТ-40/0,02.

Реле РНТ-565 використовуються для побудови диференціального захисту двохобмоткових, триобмоткових трансформаторів і з розщепленими вторинними обмотками.. Принцип дії реле полягає у наступному. Виконавче струмове реле КА підключене до робочої обмотки ПТТ спрацьовує від ЕРС, індукованої результуючим магнітним потоком спрацьовування, створеним диференціальною обмоткою й однієї або двома зрівняльними. Для створення магнітного потоку спрацьовування необхідно створити магніторушійну силу (МРС) спрацьовування, що для РНТ-565 дорівнює  $F_{cp} = 100$  ампервитків і визначається за формулою

$$F_{cp} = \sum(IW) = I_d W_d + I_{y1} W_{y1} + I_{y2} W_{y2} = 100 \text{ А}, \quad (6.1)$$

де  $I_d, I_{y1}, I_{y2}$  — струми через диференціальну і зрівняльні обмотки;

$W_d, W_{y1}, W_{y2}$  — кількість витків обмоток, що регулюється ступінчасто.

З (6.1) випливає, що спрацьовування РНТ-565 залежить від кількості задіяних витків в обмотках і величини струму через них. Достоїнство реле РНТ-565 полягає в компенсації впливу струму небалансу, у зменшенні уставки спрацьовування й у зменшенні величини струму к. з. при відключенні трансформатора. Компенсація впливу струму небалансу здійснюється за рахунок послідовного включення з диференціальною обмоткою зрівняльної обмотки, виходячи з наступного.

При включенні на різницю вторинних струмів трансформаторів струму ТАВН і ТААН через диференціальну обмотку протікає струм небалансу  $I_{НБ}^{(3K)}$  при трифазному зовнішньому к. з.

$$I_{НБ}^{(3K)} = I_{2ТАВН}^{(3K)} - I_{2ТААН}^{(3K)}, \quad (6.2)$$

де  $I_{2ТАВН}^{(3K)}, I_{2ТААН}^{(3K)}$  — вторинні струми ТАВН і ТААН при трифазному зовнішньому короткому замиканні.

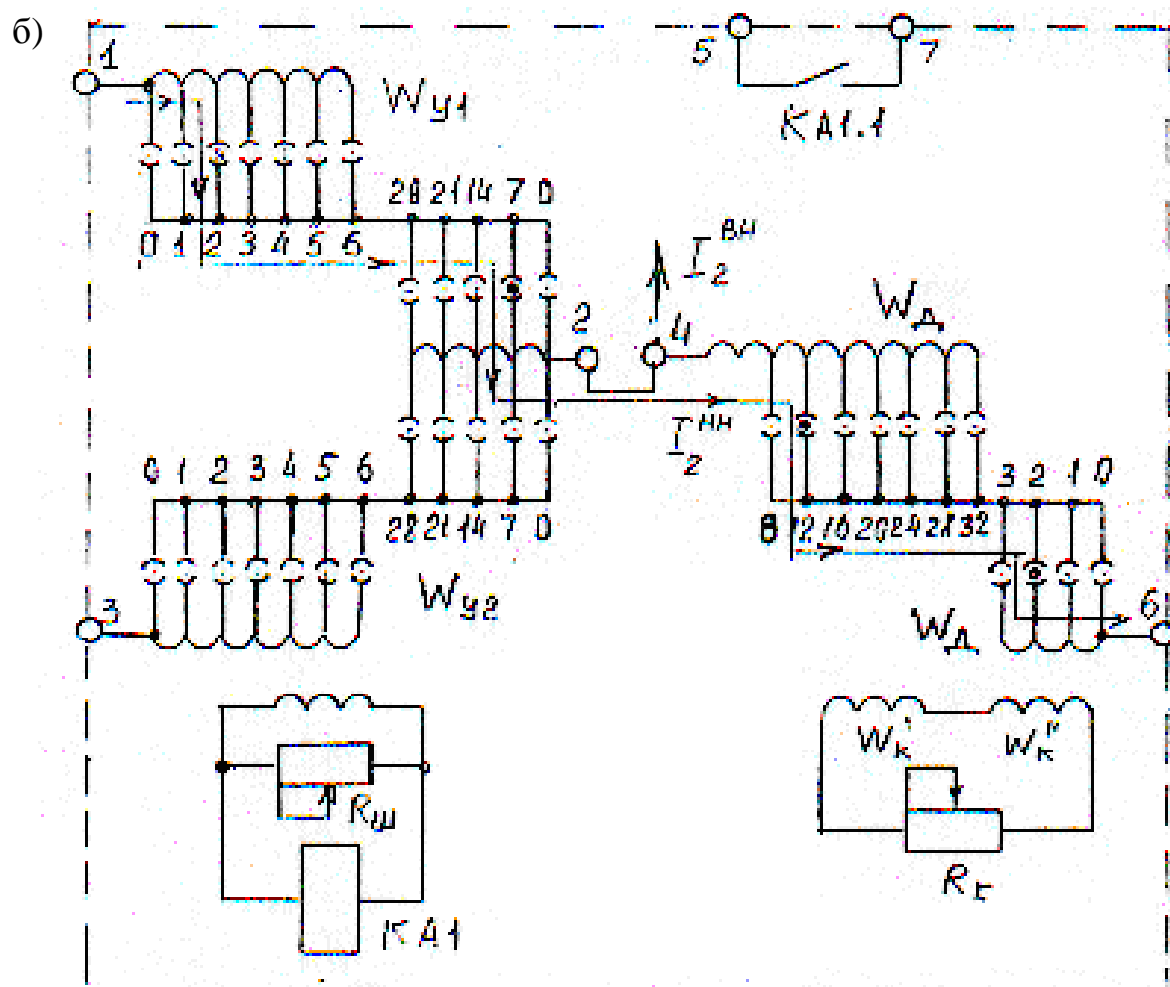
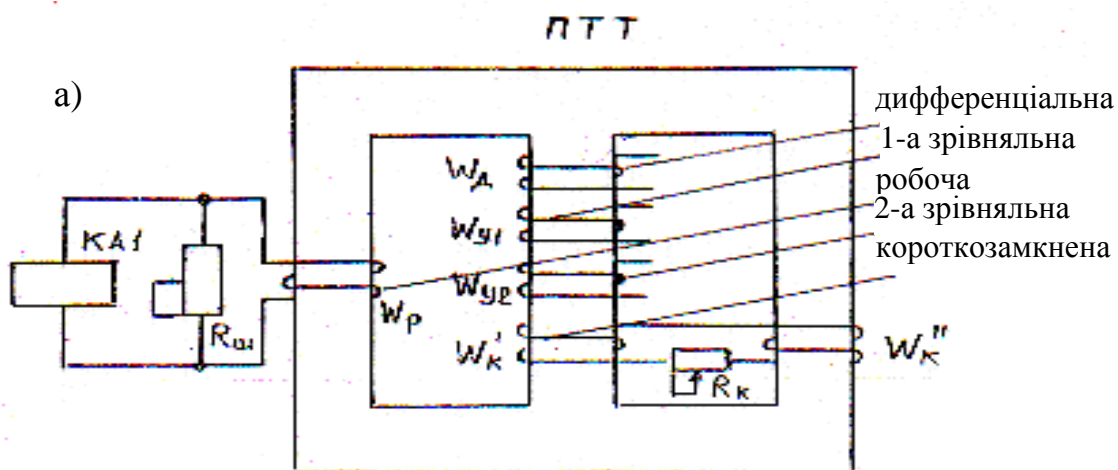


Рис. 6.3 – Диференціальне реле типу РНТ-565:  
а) будова; б) внутрішня схема

Струм небалансу (6.2) створює МРС небалансу (ампервитки)  $F_{\text{НБ}} = W_{\text{Д}} \cdot I_{\text{НБ}}$  і магнітний потік небалансу  $\Phi_{\text{НБ}}$ , який можна компенсувати ( $\Phi_{\text{НБ}} = 0$ ) додатковим магнітним потоком, створеним зрівняльною обмоткою. Для цього зрівняльну обмотку включають у вторинне коло трансформатора струму, що створює менше значення струму.

Розрахунок диференціального захисту на реле РНТ-565 полягає у визначенні уставки (струму) спрацьовування реле, схеми включення зрівняльної обмотки й у розрахунку кількості витків обмоток.

Вибір трансформаторів струму для побудови диференціального захисту виконується за умовою  $I_1^{\text{H}} > 1,4 I_{\text{ВН}}^{\text{H}} (I_{\text{НН}}^{\text{H}})$ , де  $I_1^{\text{H}}$  — номінальне стандартизоване значення первинного струму ТАВН або ТАНН;  $I_1^{\text{H}} = 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 1000 \text{ А}$ ;  $I_{\text{ВН}}^{\text{H}} (I_{\text{НН}}^{\text{H}})$  — номінальні струми обмоток ВН (НН) силового трансформатора.

Уставка спрацьовування реле РНТ-565 розраховується за формулою

$$I_{\text{ср}} = \frac{1,2 I_{\text{ВН}}^{\text{H}} K_{\text{сх}}}{K_{\text{ТАВН}}}, \quad (6.3)$$

де  $K_{\text{сх}}$  — коефіцієнт схеми з'єднання вторинних обмоток ТАВН: для схеми «трикутника»  $K_{\text{сх}} = 1$ ;

$K_{\text{ТАВН}}$  — коефіцієнт трансформації ТАВН,  $K_{\text{ТАВН}} = I_1^{\text{H}} / 5$ .

Відповідно до принципу дії реле РНТ-565 зрівняльна обмотка використовується для компенсації впливу струму небалансу шляхом її включення у вторинне коло трансформатора струму, що створює менше значення вторинного струму.

Якщо при трифазному зовнішньому к. з. має місце нерівність вторинних струмів ТАВН і ТАНН  $I_{2\text{ТАНН}}^{(3\text{K})} > I_{2\text{ТАВН}}^{(3\text{K})}$ , то зрівняльну обмотку включають у вторинне коло ТАВН. Тоді при внутрішньому к. з.  $I_{2\text{ТАНН}}^{(3\text{K})} = 0$  і реле спрацьовує від вторинного струму ТАВН відповідно до рівняння магніторухливих сил (6.1)

$$I_{\text{ср}}(W_{\text{Д}} + W_{\text{У1}}) = F_{\text{ср}} = 100 \text{ А}. \quad (6.4)$$

При зовнішньому к. з. за трансформатором реле не повинне спрацьовувати від створеної струмом небалансу (6.2) МРС небалансу. Для цього необхідно МРС небалансу від диференціальної обмотки компенсувати МРС від зрівняльної обмотки, тобто

$$I_{\text{НБ}}^{(3\text{K})} W_{\text{Д}} = I_{2\text{ТАВН}}^{(3\text{K})} W_{\text{У1}}. \quad (6.5)$$

Рівняння (6.4) і (6.5) являють собою систему рівнянь з двома невідомими  $W_{\text{А}}$  і  $W_{\text{О1}}$ , рішення якої має вигляд:

$$W_{\text{Д}} = \frac{100 I_{2\text{ТАВН}}^{(3\text{K})}}{I_{\text{ср}} I_{2\text{ТАНН}}^{(3\text{K})}}; W_{\text{У1}} = \frac{100 I_{\text{НБ}}^{(3\text{K})}}{I_{\text{ср}} I_{2\text{ТАНН}}^{(3\text{K})}}. \quad (6.6)$$



Якщо при трифазному зовнішньому к. з. існує нерівність  $I_{2ТАВН}^{(3K)} > I_{2ТАНН}^{(3K)}$ , то зрівняльну обмотку включають у вторинне коло ТАНН. Тоді при внутрішньому к. з.  $I_{2ТАНН}^{(3K)} = 0$  і реле спрацьовує від вторинного струму ТАВН

$$I_{cp} W_D = F_{cp} = 100 A . \quad (6.7)$$

При зовнішньому к. з. МРС небалансу компенсується МРС від зрівняльної обмотки в колі ТАНН, тобто

$$I_{НБ}^{(3K)} W_D = I_{2ТАНН}^{(3K)} W_{Y1} . \quad (6.8)$$

Із системи рівнянь (6.7) і (6.8) одержуємо необхідну кількість витків обмоток:

$$W_D = \frac{100}{I_{cp}} ; W_{Y1} = \frac{100 I_{НБ}^{(3K)}}{I_{cp} I_{2ТАНН}^{(3K)}} . \quad (6.9)$$

Розрахункові значення кількості витків обмоток у виді дробу округляють до цілого числа за законами округлення.

Розглянемо приклад розрахунку диференціального захисту на основі реле РНТ-565 для трансформатора потужністю  $S = 6300$  кВА, напруги обмоток  $U_{ВН} / U_{НН} = 110/10$  кВ, напруга короткого замикання —  $U_K\% = 10,5\%$ , група з'єднань обмоток ВН-НН — «зірка-трикутник-11» підключений до енергосистеми потужністю  $S = 1000$  МВА повітряною лінією з поперечним перерізом  $F_{ВЛ} = 70$  мм<sup>2</sup>.

1. Визначаємо номінальні і максимальні робочі струми обмоток ВН і НН за формулою (5.7)

$$I_{ВН}^H = 6300 / 1,73 \cdot 110 = 33 A ; I_{НН}^H = 33 \cdot 11 = 363 A ; I_{ВН}^M = 1,4 \cdot 33 = 46 A ; I_{НН}^M = 508 A .$$

Приймаємо трансформатори струму ТАВН — 50/5, ТАНН — 600/5, тобто  $K_{ТАВН} = 10$ ,  $K_{ТАНН} = 120$ .

2. Визначаємо опір елементів схеми заміщення системи електропостачання трансформатора (див. рис.5.4). Індуктивний опір енергосистеми:  $X_c = 110^2 / 1000 = 1,2$  Ом. Індуктивний і активний опори лінії 110 кВ:

$$X_{ВЛ} = X_{ВЛ}^{y0} \cdot l_{ВЛ} = 0,4 \cdot 15 = 6,0 \text{ Ом} ; R_{ВЛ} = r_{ВЛ}^{y0} \cdot \ell_{ВЛ} = 6,2 \text{ Ом} , \text{ де } X_{ВЛ}^{y0}, r_{ВЛ}^{y0} \text{ — питомі опори 1 км лінії перерізом 70 мм}^2 . \text{ Індуктивний опір трансформатора за формулою (5.7) з урахуванням } X_T = Z_T ; X_T = 0,105 \cdot 110^2 / 6,3 = 116 \text{ Ом} .$$

3. Визначаємо струми в обмотках ВН і НН трансформатора при трифазному внутрішньому к. з. за формулою (1.10)

$$I_{ВН}^{(3K)} = 110000 / 1,73 \cdot \sqrt{(7 + 6 + 116)^2} = 492 A ; I_{НН}^{(3K)} = 11 \cdot 492 = 5412 A$$

4. Вторинні струми трансформаторів струму ТАВН і ТАНН при трифазному к. з.:  $I_{2ТАНН}^{(3K)} = I_{ВН}^{(3K)} / K_{ТАВН} = 492/10 = 49,2A$ ;  $I_{2ТАНН}^{(3K)} = 45,1A$ .
5. Визначаємо струм небалансу за формулою 6.2):  $I_{НБ} = 49,2 - 45,1 = 4,1A$ , що повинний бути позитивним числом. Тому що  $I_{2ТАВН}^{(3K)} > I_{2ТАНН}^{(3K)}$ , тоді зрівняльну обмотку включаємо у вторинне коло ТАНН.
6. Уставка спрацьовування реле РНТ-565 за формулою (6.3)  $I_{cp} = 1,2 \cdot 33 \cdot 1,73/10 = 6,85A$ .
7. Розрахункова кількість витків диференціальної і зрівняльної обмоток за формулою (6.9):  $W_d = 100/6,85 = 14,5$ ;  $W_{yl} = 100 \cdot 4,1/(6,85 \cdot 45,1) = 1,3$ . Округляємо до цілих чисел  $W_d = 15$  і  $W_{yl} = 2$  витки.
8. Складаємо схему диференціального захисту на реле РНТ-565 (рис. 6.4).

### 6.3. Диференціальний захист на основі реле ДЗТ-11

Застосовується для трансформаторів потужністю більше 16 МВА. Реле ДЗТ-11 відрізняється від реле РНТ-565 наявністю так названої гальмової обмотки. Якщо реле РНТ-565 спрацьовує при МДС  $F_{cp} = 100$  ампер-витків, то МРС спрацьовування для реле ДЗТ-11 зростає з ростом струму зовнішнього к. з. (рис. 6.5).

Залежність  $F_{cp} = f(I_{к.з.})$  називають гальмовою характеристикою. Це практично виключає спрацьовування ДЗТ-11 при зовнішньому к. з.

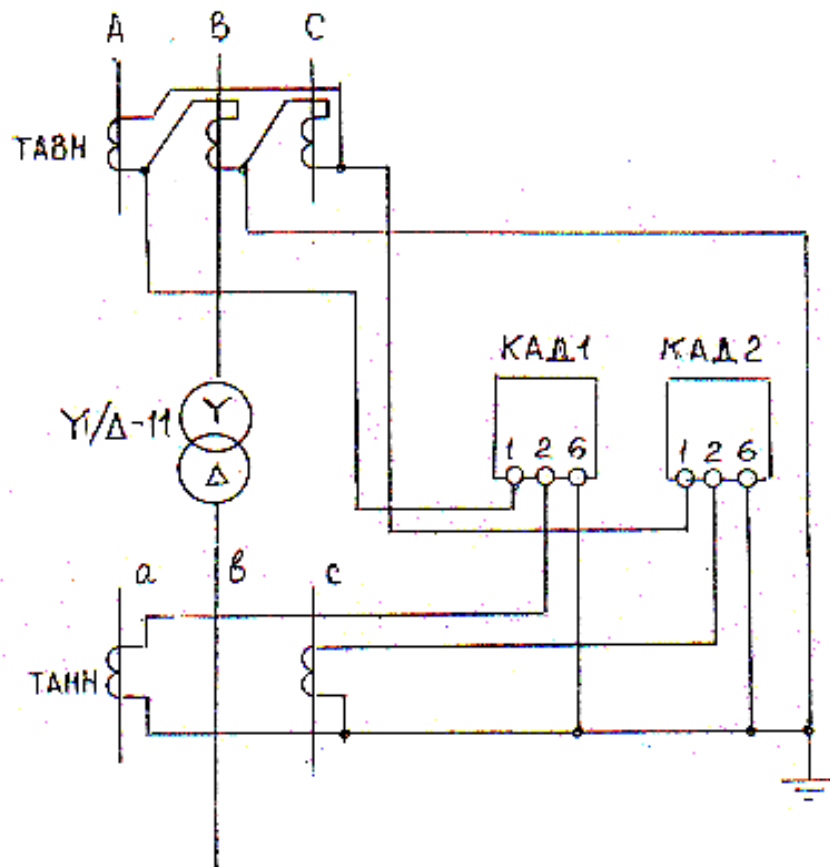


Рис. 6.4 – Схема диференціального захисту на реле типу РНТ-565

Конструкція і внутрішня схема реле ДЗТ-11 показані на рис.6.6;6.7. Гальмова обмотка ТО у вигляді двох секцій намотана на крайніх стрижнях проміжного трансформатора струму (ПТТ) таким чином, щоб її магнітні потоки віднімалися з магнітного потоку від диференціальної і зрівняльної обмоток. Тоді в напівсекціях робочої обмотки не індукується ЕРС і не спрацьовує виконавче КА при зовнішніх к. з.. При внутрішніх к.з. у гальмовій обмотці струм і магнітний потік від трансформатора струму на стороні НН дорівнюють нулю і реле КА спрацьовує.

Гальмова обмотка завжди включається на стороні обмотки НН двохобмоткового трансформатора і на суму струмів обмоток НН для трансформаторів з розщепленими обмотками. Для трьох обмотувальних трансформаторів гальмова обмотка включається на суму струмів обмоток НН і СН (рис. 6.8).

Розрахунок диференціального захисту на реле ДЗТ-11 полягає у визначенні уставки спрацьовування реле, схеми включення зрівняльної обмотки і в розрахунку кількості витків обмоток.

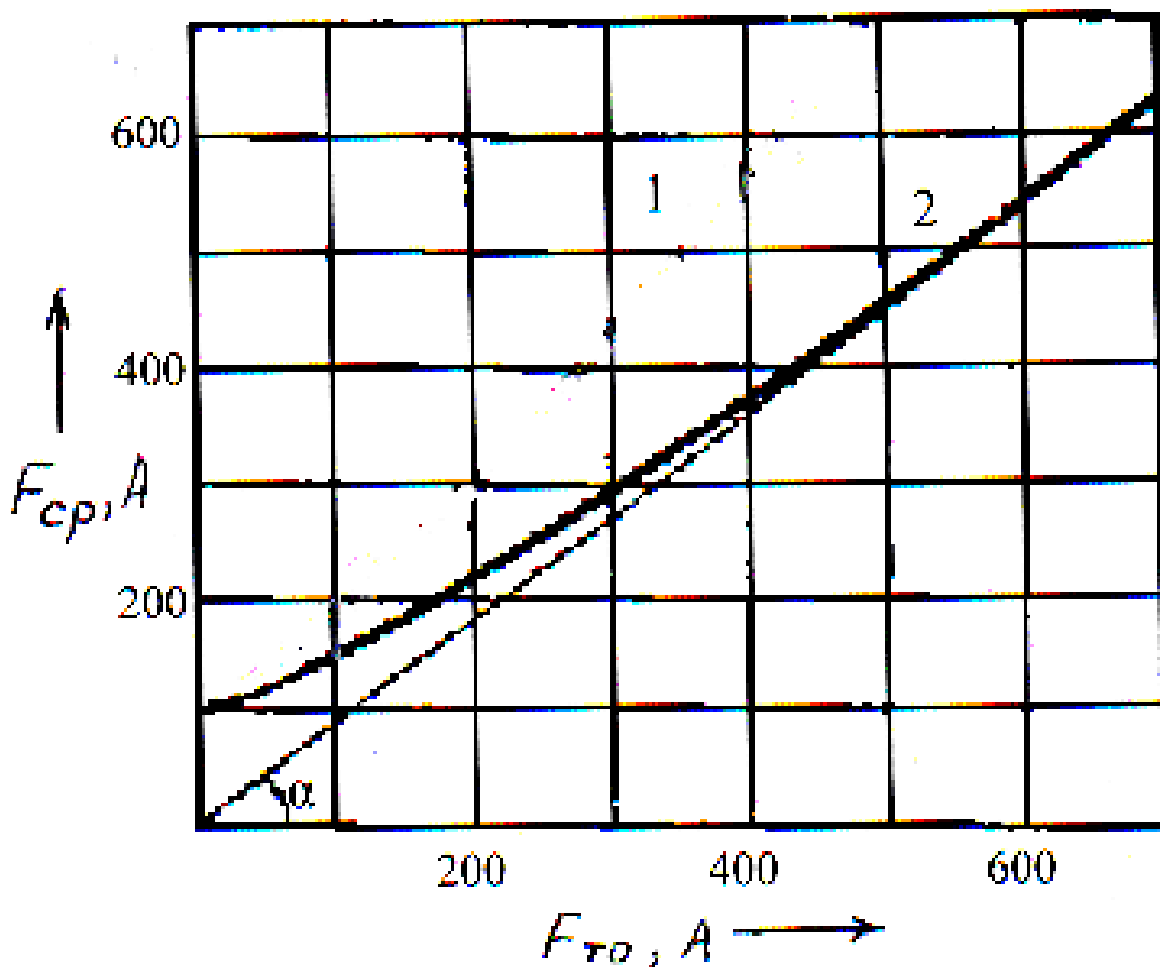


Рис. 6.5- Залежність МРС спрацьовування реле типу ДЗТ-11 від МРС гальмівної обмотки

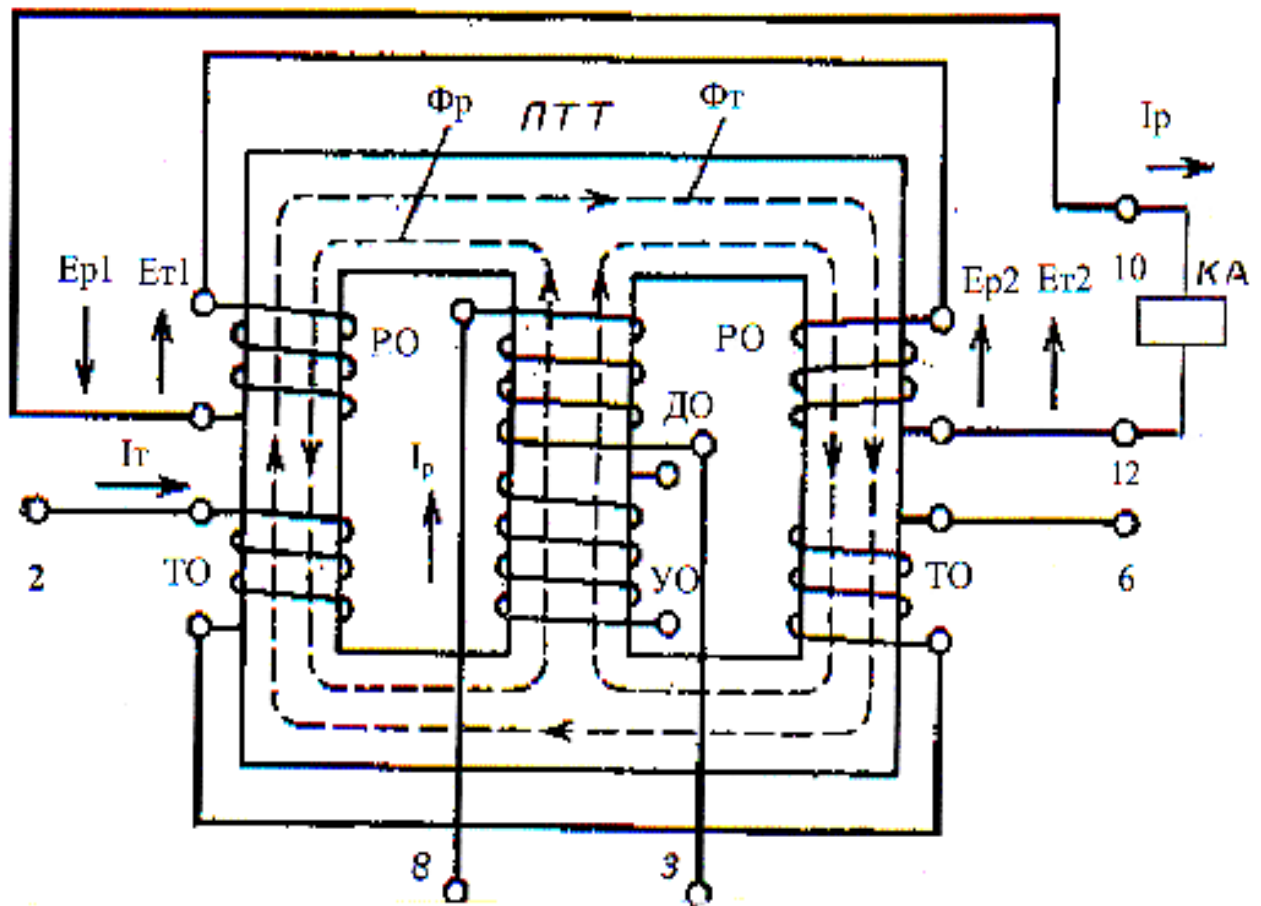


Рис. 6.6 – Будова диференціального реле типу ДЗТ-11

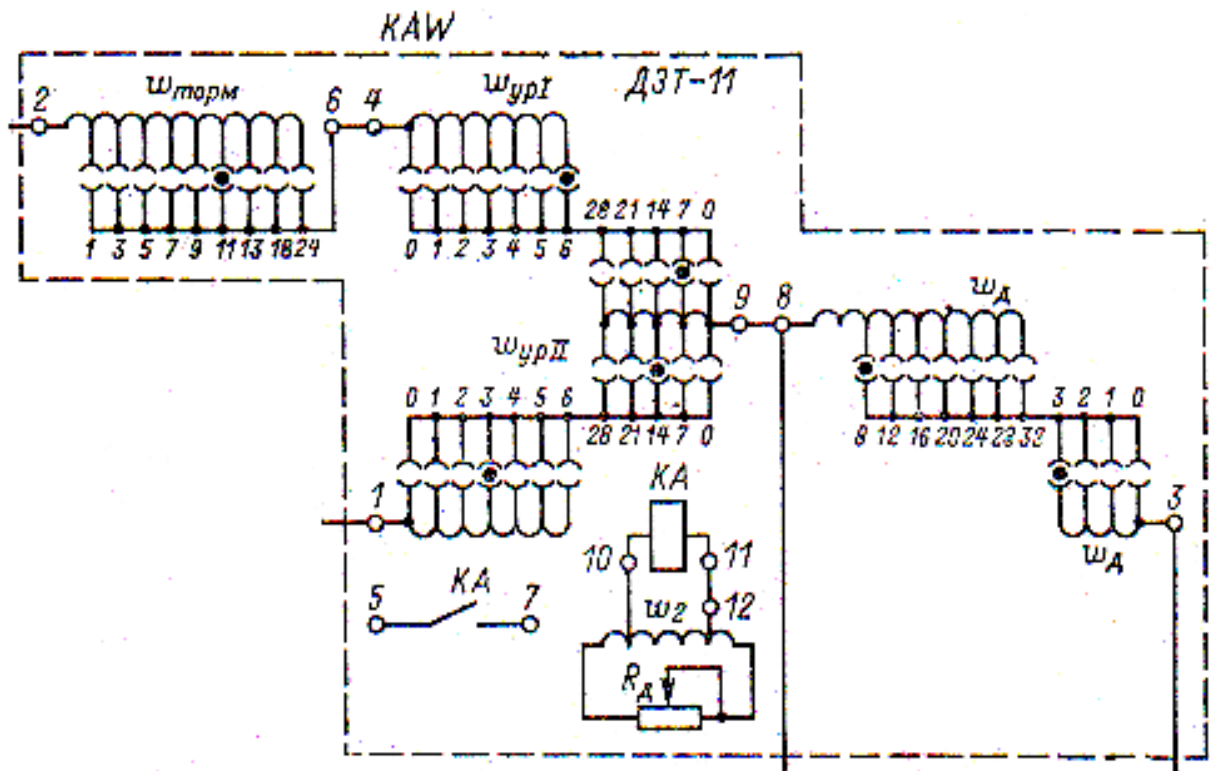


Рис. 6.7- Схема електрична реле типу ДЗТ-11

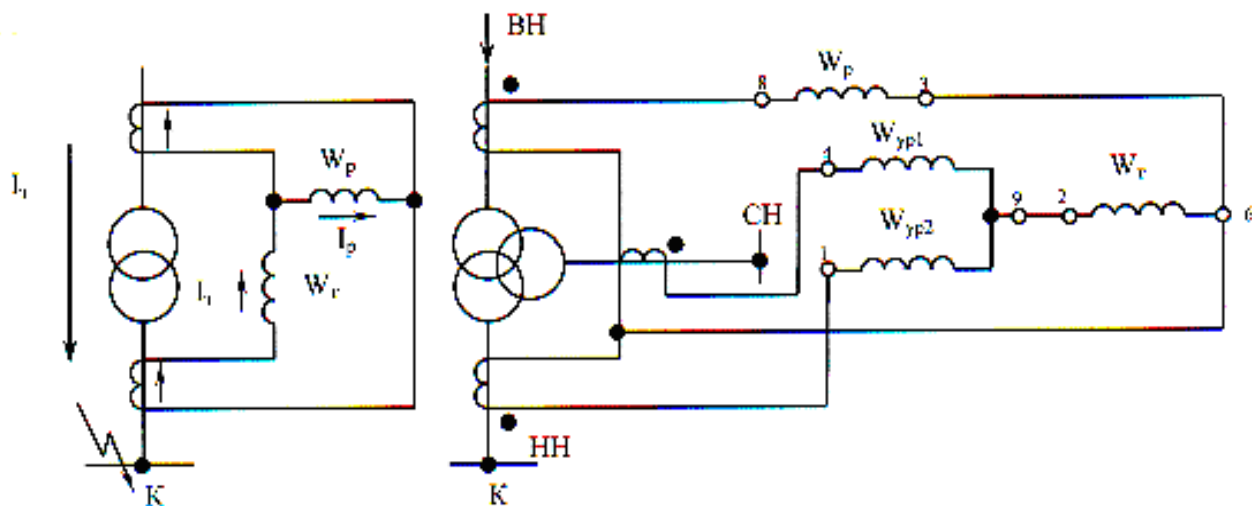


Рис. 6.8- Схеми диференціальних захистів трансформаторів на реле ДЗТ-11

Методика розрахунку реле ДЗТ-11 аналогічна для реле РНТ-565, а кількість витків гальмової обмотки визначається за формулою

$$W_T = W_D \frac{I_{НВ}^{(ЗК)}}{I_{2ТАНН}^{(ЗК)}}. \quad (6.10)$$

Для триобмоткових трансформаторів із двох значень  $I_{2ТАСН}^{(ЗК)}$  і  $I_{2ТАНН}^{(ЗК)}$  беруть більше і також більше значення струму небалансу.

## 7. МАКСИМАЛЬНИЙ СТРУМОВИЙ ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Максимальний струмовий захист (МСЗ) з витримкою часу відповідно до ступеневого принципу і вимог ПУЕ встановлюється обов'язково на всіх трансформаторах потужністю більше 400 кВА з метою резервування неспрацьовування диференціального захисту, захисту шин і захистів ліній, що відходять. Витримка часу спрацьовування МСЗ трансформатора повинна бути більше на ступінь селективності  $\Delta t = 0,4 \text{ сек}$  відповідно до ступеневого принципу побудови захистів від витримки часу МСЗ ліній, що відходять, але менш часу термостійкості ізоляції трансформатора (не більше 3сек). Узагальнена спрощена схема МСЗ трансформатора показана на рис. 7.1.

На двохобмоткових трансформаторах МСЗ встановлюють на стороні обмотки ВН, при цьому вона діє на відключення вимикачів на обмотках ВН і НН. На три обмоткових трансформаторах і з розщепленими вторинними обмотками МСЗ встановлюють на сторонах обмоток НН і СН. У загальному випадку схема МСЗ містить наступні три захисти.

Однофазний МСЗ0 призначений для захисту від симетричних перевантажень при відключенні паралельно працюючого трансформатора або запуску високовольтних двигунів порівнянної потужності, а також як 1-й ступінь струмового захисту для резервування неспрацьовування 2-го і 3-го ступенів МСЗ системи шин і ліній, що відходять.

Вона спрацьовує з витримкою часу до 3-х хвилин і діє на сигнал оперативному персоналові. Уставка спрацьовування МСЗ0 визначається за формулою

$$I_{MT30} = \frac{K_{3АП} \times K_{СЗП}}{K_B} I_{BH}^M, \quad (7.1)$$

де  $K_{3АП} = 1,2$  — коефіцієнт запасу;

$K_{СЗП} = 1,5$  — коефіцієнт самозапуску високовольтних електродвигунів порівнянної потужності, при їхній відсутності  $K_{СЗП} = 1$ ;

$K_B = 0,8$  — коефіцієнт повернення струмового реле;

$I_{BH}^M$  — максимальний робочий струм, визначається за формулою (5.7).

Максимальний струмовий захист нульової послідовності (МСЗНП) захищає трансформатор від однофазних зовнішніх к. з. у мережах із глухозаземленою нейтраллю. Принцип роботи МСЗНП заснований на появі струму в нейтралі обмотки (рис. 7.1), що з'являється тільки при однофазних к. з. обмотки на заземлений корпус трансформатора і на лініях, що відходять. Уставка спрацьовування МСЗНП розраховується за емпіричною формулою

$$I_{МСЗН} = 0,5 I_{BH}^H. \quad (7.2)$$

Перевірка МСЗНП на чутливість згідно з вимогами ПУЕ визначається за величиною коефіцієнта чутливості за умовою:

$$K_{чув}^{MT3} = \frac{I_{BH}^{(1K)}}{I_{MT3}} > 1,5, \quad (7.3)$$

де  $I_{BH}^{(1K)}$  -струм в ушкодженій фазі обмотки ВН.

Максимальний струмовий захист зворотної послідовності (МСЗП) захищає трансформатор від зовнішніх двофазних к. з. на шинах НН і лініях, що відходять, тобто за зоною дії диференціального захисту. Принцип роботи МСЗП заснований на вимірі ступеня несиметрії трифазних струмів або напруг, що виникають при двофазних к. з.

Для контролю ступеня несиметрії використовують реле КУЗ (рис.7.1) напруги (наприклад типу РНФ-1) зворотної послідовності, на корпусах яких зазначені уставки спрацьовування при несиметрії у відсотках від номінальних напруги або струмів. Контакт реле РНФ-1 або РТФ-7 включається послідовно з контактом струмового реле КА2,3. Уставка спрацьовування РТ-40 дорівнює  $2I_{BH}^H$ . На чутливість МСЗП не перевіряється. Складові напруг і струмів нульової і зворотної послідовностей розраховуються за методом симетричних складових. Для прикладу розрахуємо складові при двофазному зовнішньому к. з., якщо фазні напруги дорівнюють:

$$U_A = 360e^{j5} B_1 \cdot U_B = 375e^{-j140} B; U_C = 360e^{j117}; I_A = 17e^{-j514} A; I_B = 12e^{-j140} A; I_C = 17e^{j150} A.$$

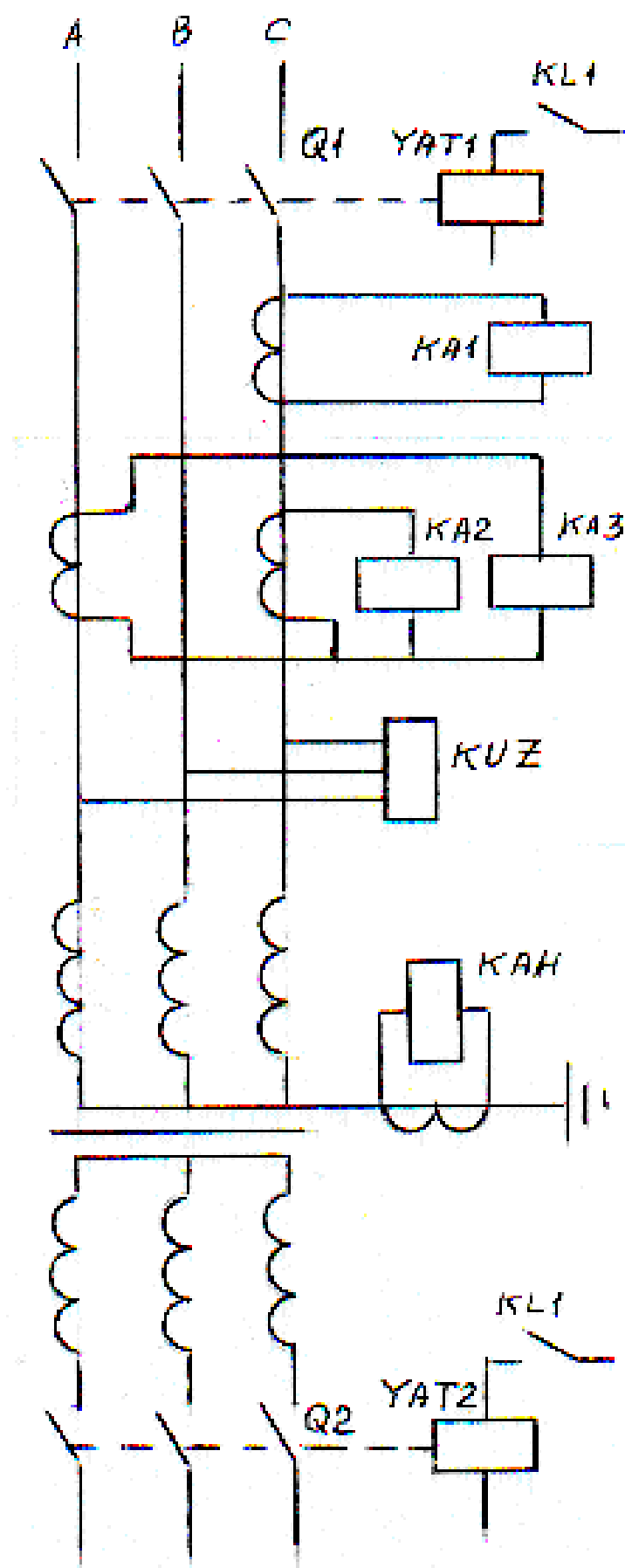


Рис. 7.1 – Схема максимального струмового захисту



Для розрахунку складову напругу нульової послідовності вектори напруг з показової форми переводимо в алгебраїчну форму комплексного числа і почленно складаємо дійсні і уявні частини, тобто

$$3U_0 = U_A + U_B + U_C = 359 + j31 - 287 - j241 - 163 + j320 = -91 + j110 = 142e^{-j50^\circ} \text{ В.}$$

Складові напруги зворотної послідовності дорівнюють

$$3U_z = U_A + U_B e^{j240^\circ} + U_C e^{j120^\circ} = 359 + j31 - 65 + j369 - 196 - j301 = 98 + j99 = 139e^{j45^\circ} \text{ В.}$$

Максимальний струмовий захист трансформаторів з напругами  $U_{ВН}/U_{НН} = 10/0,4 \text{ кВ}$  здійснюється на вході живильної лінії 10 кВ і буде розглянута нижче. Підключення самого трансформатора до живильної лінії згідно з нормами проектування підстанцій 10/0,4 кВ виконується через роз'єднувач і запобіжник.

Розрахунковий струм плавкої вставки запобіжника визначається за формулою  $I_{ПВ}^P = 2I_{ВН}^H$ . По розрахунковому струмі приймають плавку вставку зі стандартним номінальним струмом  $I_{ІА}^I$  у більшу або меншу сторону за законами округлення.

Відповідно до вимог ПУЕ запобіжник на стороні ВН перевіряється на чутливість і селективність. Чутливість перевіряється за коефіцієнтом чутливості за формулою  $K_{чув} = I_{ВН}^{(1K)} / I_{ПВ}^H > 3$ , де  $I_{ВН}^{(1K)}$  — струм в обмотці ВН при однофазному к. з. на стороні НН визначається за формулою (5.10а).

Селективність запобіжника на стороні ВН перевіряється за допомогою порівняння ампер-секундних (захисних) характеристик запобіжників на сторонах ВН і НН шляхом порівняння часу їхнього спрацювання. Запобіжник на стороні ВН вважається селективним, якщо час його спрацювання в три рази більше часу спрацювання запобіжника на стороні 0,4 кВ, тобто  $t_{ПВ}^{НН} > 3t_{ПВ}^{ВН}$ .

## 8. ГАЗОВИЙ ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Струми коротких замикань в обмотках трансформаторів створюють значні електродинамічні сили, що викликають деформацію обмоток взаємну вібрацію витків із взаємним тертям між ними. Внаслідок цих явищ відбувається руйнування міжвиткової ізоляції й утворення короткозамкнених витків (к. з. — витків).

При цьому в к. з. – витках унаслідок їхнього низького опору протікає значний струм, хоча при цьому в самих обмотках ВН і НН струм зростає несуттєво і струмовий захист обмоток не реагує на появу к. з. витків.

При утворенні малої кількості к. з. – витків трансформатор може залишатися якийсь час у роботі до виводу в ремонт. При значній кількості к. з. – витків трансформатор повинний миттєво відключатися від мережі.

Таким чином, захист від к. з. – витків повинна мати дві ступіні спрацьовування: 1-а ступінь діє на сигналізацію персоналові; 2-а ступінь — на відключення.

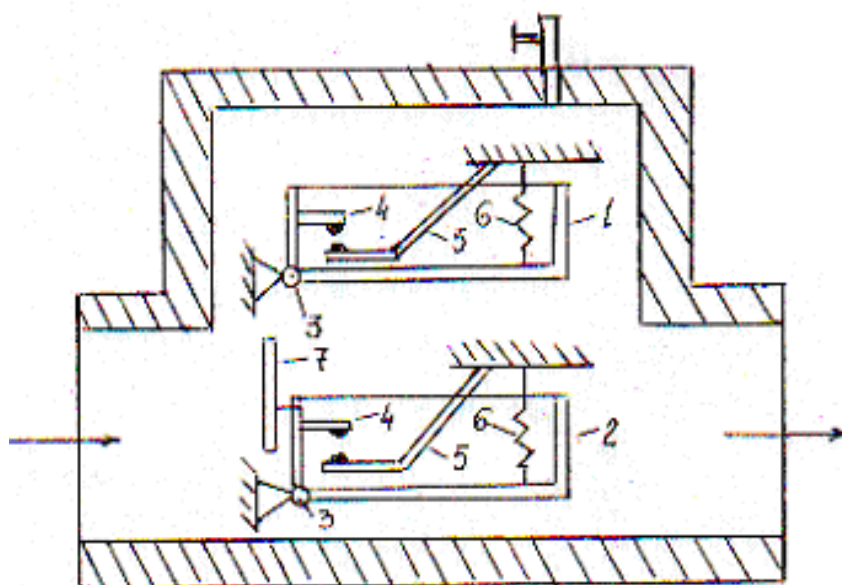
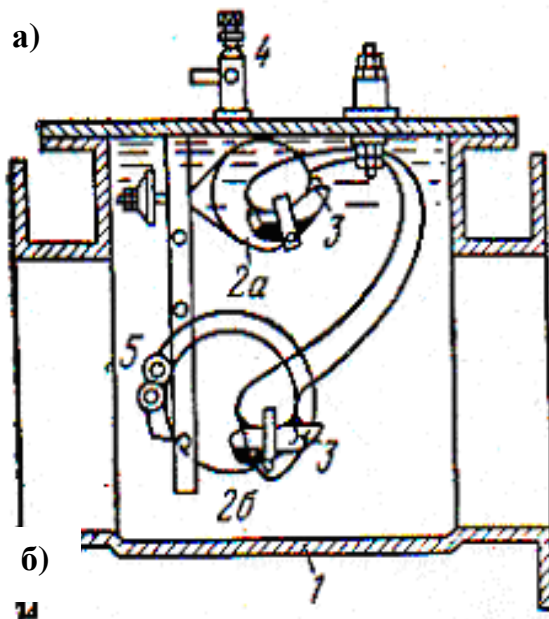
Принцип дії захисту від к. з. витків побудований на тому, що в місці утворення к. з. – витків відбувається місцеве нагрівання охолоджувального масла до температури його розкладання на летючі гази.

Таким чином, утворення к. з. – витків можна знайти за утворенням летючих газів при місцевому нагріванні масла і його розкладанні при цьому за допомогою спеціального газового реле. Тому захист від к. з. – витків одержав назву газового захисту, що, крім цього, забезпечує захист від неприпустимого зниження рівня охолоджувального масла. Газовий захист згідно з вимогами ПУЕ встановлюється обов'язково на трансформаторах потужністю 6.3 МВА і більш, хоча ПУЕ допускає його установку і на трансформаторах меншої потужності при наявності чергового персоналу.

Газове реле буває двох типів: з поплавцями і з чашками. Будова поплавкового і чашкового реле РГЧЗ-66 показані на рис.8.1. У верхній і нижній частині корпусу 1 реле встановлені два поплавці (чашки) 2, що можуть повертатися навколо осі 3 разом із ртутними контактами 4. Штуцер 5 служить для добору проби газу для аналізу на горючість. Пальний газ свідчить про те, що виділяється не повітря, а газ, що виникає при розкладанні масла. У нормальному режимі корпус реле заповнений маслом і поплавці (чашки) знаходяться в горизонтальному положенні.

При незначному виділенні газу витісняється масло з верхньої частини корпусу. Верхній поплавець (чашка) опускається, замикаючи контакт на сигналізацію черговому персоналові. Така ж дія газового реле відбувається при зниженні рівня масла в розширювальному баці.

При значному газоутворенні великий обсяг газу витісняє масло з усього корпусу реле, нижній поплавець (чашка) опускається, контакт якого діє на відключення трансформатора від мережі.



**Рис. 8.1 - Будова газового реле:**  
а) поплавкового; б) чашкового

При установці нахил труби з газовим реле щодо верхньої кришки трансформатора 1,5...2% для запобігання скупчення пухирців газу під кришкою. Нахил корпусу трансформатора щодо рівня землі 1...1,5% (рис.8.2).

Під час доливання масла в трансформатор і на час виділення повітря після цього газовий захист відключається.

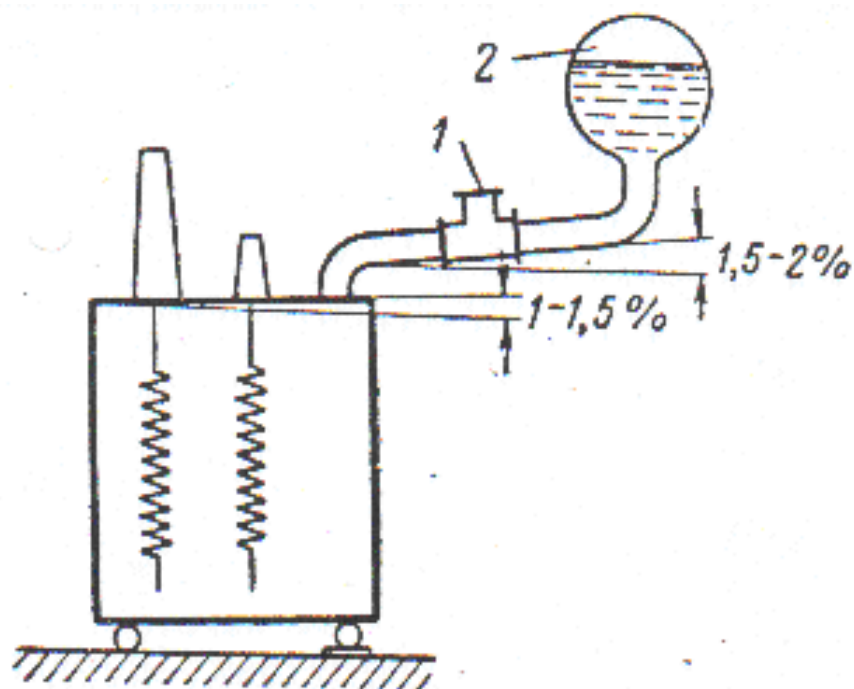


Рис. 8.2 – Установка газового реле

Схема газового захисту показана на рис. 8.3 і містить двох ступіней спрацьовування: 1-я ступінь контакт SL 1.1 діє на сигналізацію, 2-я — контакт SL1.2 — на відключення.

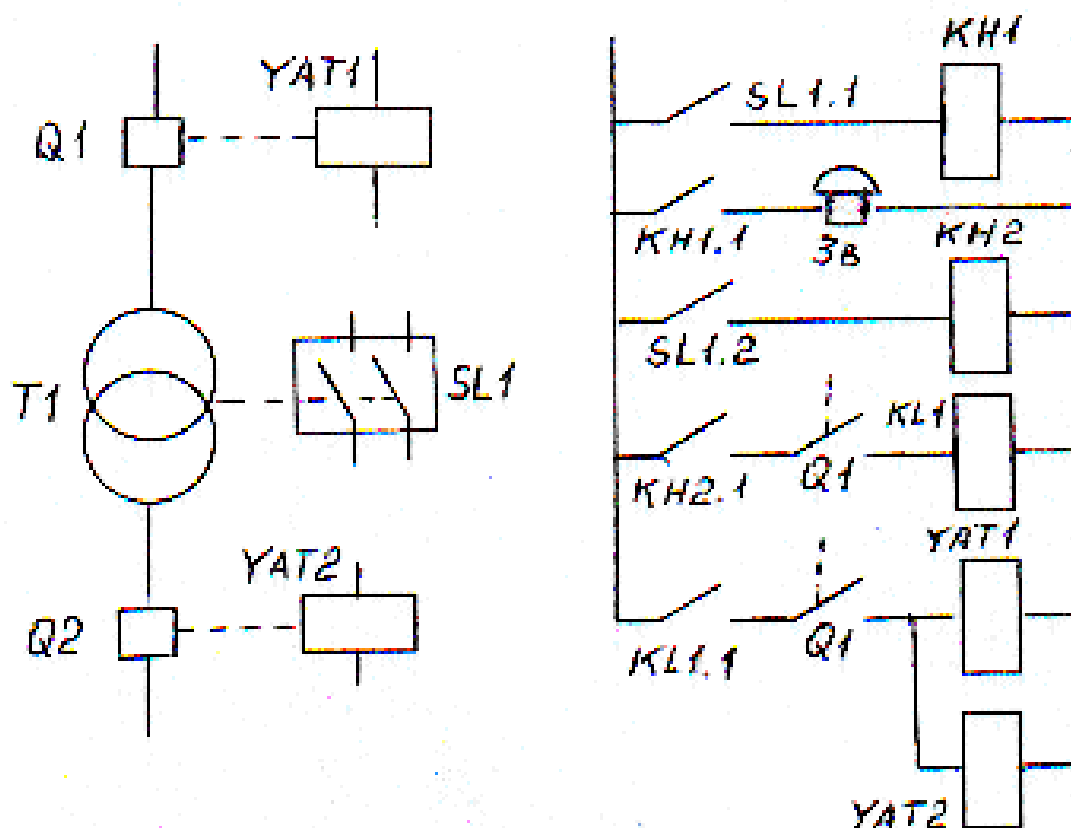


Рис. 8.3 – Схема газового захисту

## 9.РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ЛІНІЙ 6-35 кВ

### 9.1. Загальні відомості про лінії

Повітряні і кабельні лінії 6-35 кВ працюють у мережах з ізольованою або компенсованою нейтраллю. За схемою включення в мережу лінії бувають: радіальні, магістральні, петльові, кільцеві, паралельні і послідовні (рис.9.1).

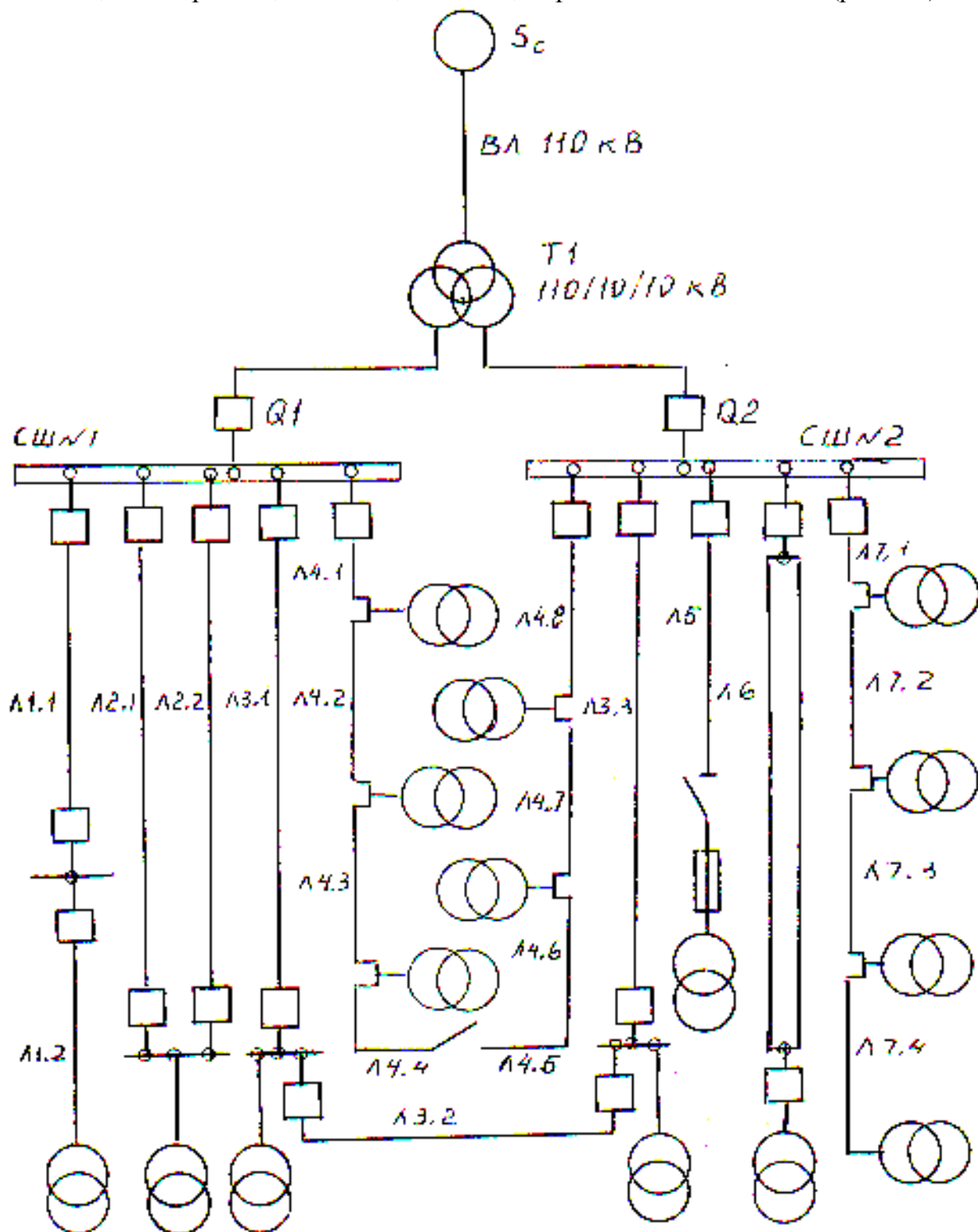


Рис. 9.1 – Типи ліній електропередач напругою 6-35 кВ

Кабельні лінії найчастіше виконуються кабелем марки ААШВ, тобто алюмінієві жили, алюмінієва оболонка для захисту жил від проникнення вологи, поверх оболонки шланг із вінілу від блукаючих струмів і електрокорозії. Повітряні лінії з алюмінієвих або сталю-алюмінієвих проводів.

Активний опір фази лінії визначається за формулами

$$R_{\text{л}} = r_{\text{уд}} \cdot l_{\text{л}}; R_{\text{л}} = \frac{0,029}{F_{\text{л}}}, \quad (9.1)$$

де  $r_{\text{уд}}$  — питомий опір 1 км лінії, Ом/км задається в довідниках для кожного перерізу і матеріалу;

$l_{\text{л}}$  — довжина лінії в км для першої формули, а для другої у М ;

$F_{\text{л}}$  — переріз лінії 16-240 мм<sup>2</sup>.

Лінія являє собою котушку з одним витком, у якій індукується ЕРС самоіндукції відповідно до закону Фарадея, тобто  $e = 1d(\Phi_m \sin \omega t) / dt = 1\omega\Phi_m \cos \omega t$ . Магнітний потік  $\Phi_m$  пропорційний струму, тобто,  $\Phi_m = LI_m$ , де  $L$  — індуктивність (коефіцієнт перерахування). Тоді діюче значення ЕРС самоіндукції  $E = \omega LI$ , звідки впливає поняття індуктивного опору, виходячи з закону Ома, тобто  $I = U / \omega L = U / X_L$ . Індуктивність котушки пропорційна її діаметрові, тому індуктивні опори повітряних ліній більше, ніж у кабельних:

$$X_{\text{ВЛ}} = X_{\text{уд}}^{\text{ВЛ}} \cdot l_{\text{ВЛ}} = 0,4 \cdot l_{\text{ВЛ}}; X_{\text{КЛ}} = 0,08 \cdot l_{\text{КЛ}}, \quad (9.2)$$

де  $X_{\text{уд}}^{\text{ВЛ}}, X_{\text{уд}}^{\text{КЛ}}$  — питомий індуктивний опір 1 км лінії.

Лінії щодо землі з діелектриком між ними являють собою конденсатори. Ємність конденсатора  $C$  прямо пропорційна довжині лінії обернено пропорційна відстані між нею і землею. Тому ємність кабельної лінії щодо землі враховують, а ємністю повітряної лінії нехтують.

При підключенні лінії навіть без навантаження до джерела змінного струму з'являється струм у лінії ємнісного характеру

$$i_{\text{КЛ}} = C_{\text{КЛ}} \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = \omega C_{\text{КЛ}} U_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \pi / 2). \quad (9.3)$$

Питоме діюче значення ємнісного струму  $I_{\text{КЛ}}^{\text{уд}} = \omega C_{\text{КЛ}}$  на 1 км лінії залежить від перерізу і напруги лінії і дається в довідниках, наприклад, для кабельних ліній напругою 10 кВ і перерізом 16-240 мм<sup>2</sup> дорівнює  $I_{\text{КЛ}}^{\text{уд}} = 0,52 - 1,7 \text{ А / км}$ . До речі, з (9.3) впливає поняття ємнісного опору, виходячи з закону Ома, тобто

$$I = \omega CU \rightarrow X_c = U / I = 1 / \omega C.$$

## 9.2. Розрахунок струмових режимів ліній

Розрізняють такі режими роботи ліній: нормальний і післяаварійний, дво- і трифазне к. з., однофазне к. з. на землю.

У нормальному режимі струм лінії визначається номінальною потужністю  $S_T$  підключених до неї трансформаторів. Тоді для радіальної лінії  $I_{pi}^H = S_T / \sqrt{3}U$ , для магістральної лінії  $I_{KL3}^H = (S_{T3} + S_{T4} + S_{T5}) / \sqrt{3}U$ ;  $I_{KL4}^H = (S_{T4} + S_{T5})$ ;  $I_{KL5}^H = S_{T5} / \sqrt{3}U$ . (рис.9.2). Струми післяаварійного режиму одержуємо множенням струмів нормального режиму на коефіцієнт 1,4.

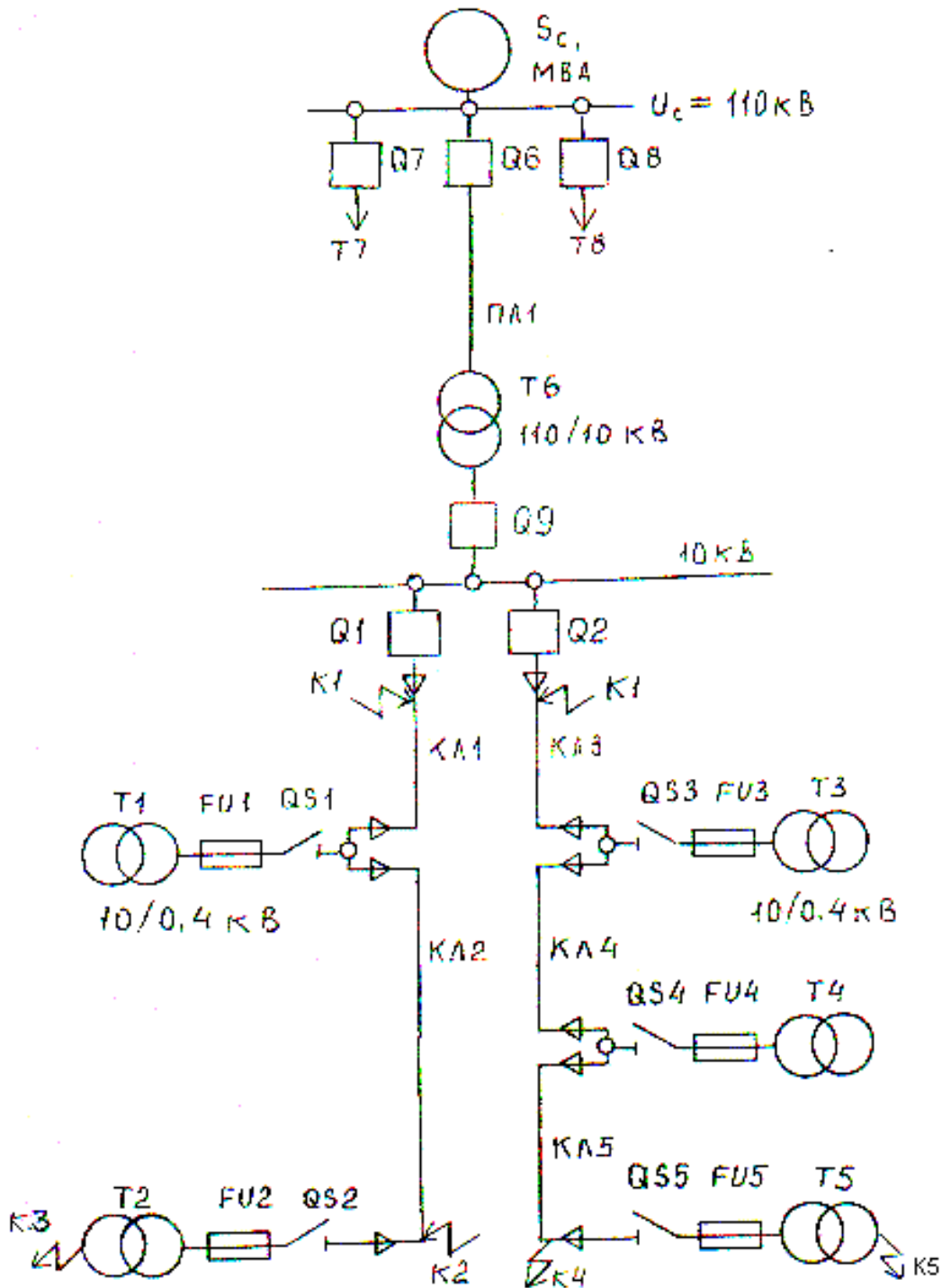


Рис. 9.2 – Схема магістральної кабельної мережі

Петльові лінії в нормальному режимі працюють з розімкнутою петлею, а в післяаварійному із замкнутою. Тому струм післяаварійного режиму визначається потужністю всіх трансформаторів, тобто (рис.5.1)  $I = \sum S_T / \sqrt{3}U$ .

Необхідний розрахунковий переріз  $F_p$  ліній визначається за економічною щільністю  $I_{\text{ек}}$  струму, значення якої дані в ПУЕ, наприклад для ліній з максимальним робочим струмом протягом 3000-5000 годин у році вона дорівнює  $i_{\text{ек}} = 1,4 \text{ А/мм}^2$ , тоді  $F_p = I_{\text{пл}}^H / i_{\text{ек}}$ . За розрахунковим значенням приймають стандартне значення за законами округлення і перевіряють за припустимим струмом нагрівання і втрати напруги в лінії в післяаварійному режимі.

Для розрахунку струмів у лініях при дво- і трифазних к. з. у будь-якій точці мережі (рис.9.3) складається схема заміщення, у якій реальні лінії і трансформатори замінюються активними й індуктивними опорами (рис.9.3).

У схемі заміщення реальні опори ліній і трансформаторів визначаються за формулами (5.7), (9.1), (9.2). Опори ліній 10 кВ і трансформаторів 10/0,4 кВ приводяться до напруги 110 кВ множенням на коефіцієнт  $K_T^2$  трансформації трансформатора 110/10 кВ, тобто

$$R_{\text{кл}}^{\text{п}} = R_{\text{кл}} K_T^2; X_{\text{кл}}^{\text{н}} = X_{\text{кл}} \cdot K_T^2; X_{\text{т1}}^{\text{н}} = X_{\text{т1}} K_T^2; R_{\text{т1}}^{\text{н}} = R_{\text{т1}} \cdot K_T^2.$$

Струм у лінії 10 кВ при трифазному к. з. у будь-якій точці мережі дорівнює

$$I^{(3\text{к})} = \frac{U = 110 \text{ кВ}}{\sqrt{3} \sqrt{\sum R^2 + \sum X^2}}, \quad (9.4)$$

де  $\sum R^2, \sum X^2$  — сума опорів елементів мережі до точки к. з.

Струм у лінії при двофазному к. з. визначається не фазною, а лінійною напругою, тобто струм к.з. не фазний, а лінійний і опір не однієї фази лінії, а двох- фазних проводів, тобто

$$I^{(2\text{к})} = \frac{\sqrt{3} I^{(3\text{к})}}{2}. \quad (9.5)$$

Отримані значення струмів к. з. у лініях 10 кВ є приведеними до високої напруги 110 кВ, тобто вони менше реальних на величину коефіцієнта трансформації трансформатора 110/10 кВ, тобто реальні струми дорівнюють

$$I_p^{(3\text{к})} = K_T \cdot I^{(3\text{к})}; I_p^{(2\text{к})} = K_T I^{(2\text{к})}.$$

Режим однофазного замикання на землю не є небезпечним для лінії з погляду її нагрівання до небезпечних температур більше 90°C. Однак залишати лінію під напругою більш 2 годин не рекомендується, тому що однофазне к. з. може перейти в двофазне з наступним відключенням споживачів від електропостачання.



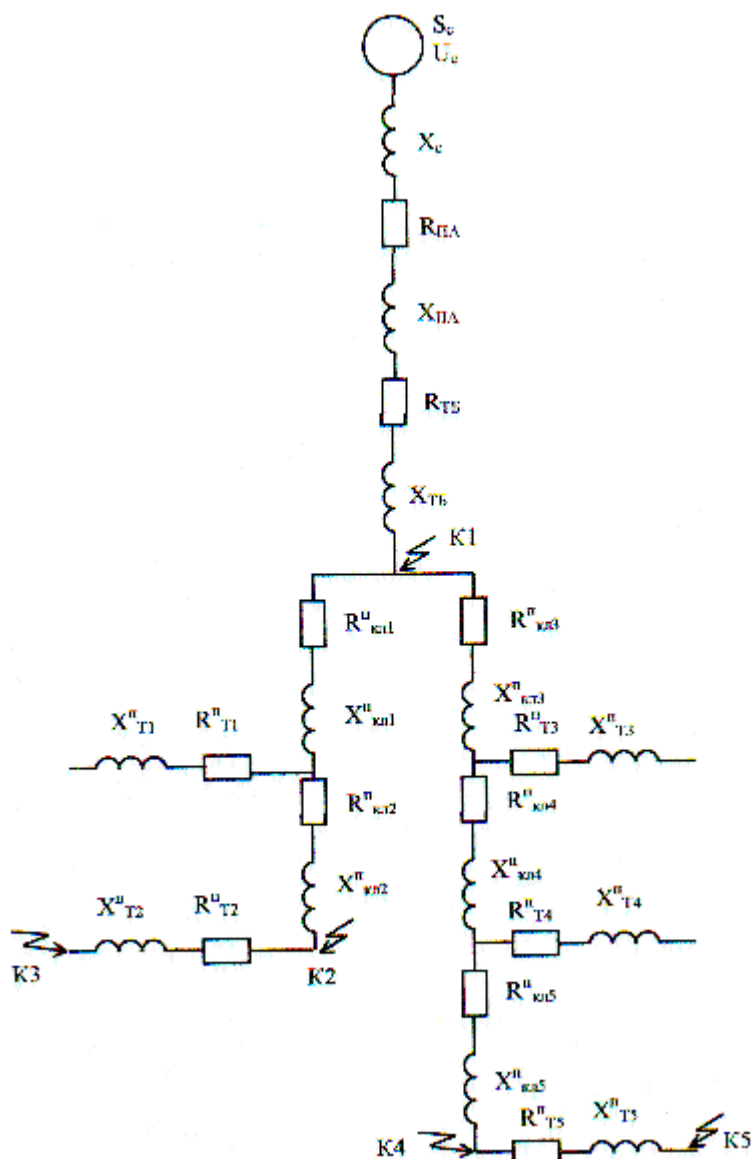


Рис. 9.3 – Схема заміщення магістральної кабельної мережі

За кожною з ліній, що відходять, протікає власний ємнісний струм, який залежить від власної ємності лінії щодо землі. При однофазному к. з. на землю ємності двох інших фаз, у тому числі і на неушкоджених лініях, виявляються не під фазною напругою, а під лінійним. Ємнісні струми неушкоджених фаз стають лінійними, а не фазними як при нормальному режимі, тобто збільшуються в 1,73 рази і протікають через ушкоджену фазу (рис. 9.4).

Величина ємнісного струму через ушкоджену фазу визначається з векторної діаграми (рис. 9.4), що будується в такий спосіб. Будуємо вектори лінійних напруг  $U_{CA}$  і  $U_{BA}$  під кутом  $90^\circ$ , до них будуємо вектори лінійних ємнісних струмів  $I_B$  і  $I_C$ . За першим законом Кірхгофа вектор струму в ушкодженій фазі буде

$I_A = I_B + I_C = 2I_B^l = 2\sqrt{3}I_B^\phi$ . Модуль вектора  $I_A = 2\sqrt{3}I_B^\phi \cdot \cos 30^\circ = 3I_B^\phi$ , де  $I_B^\phi$  — власний ємнісний струм лінії.

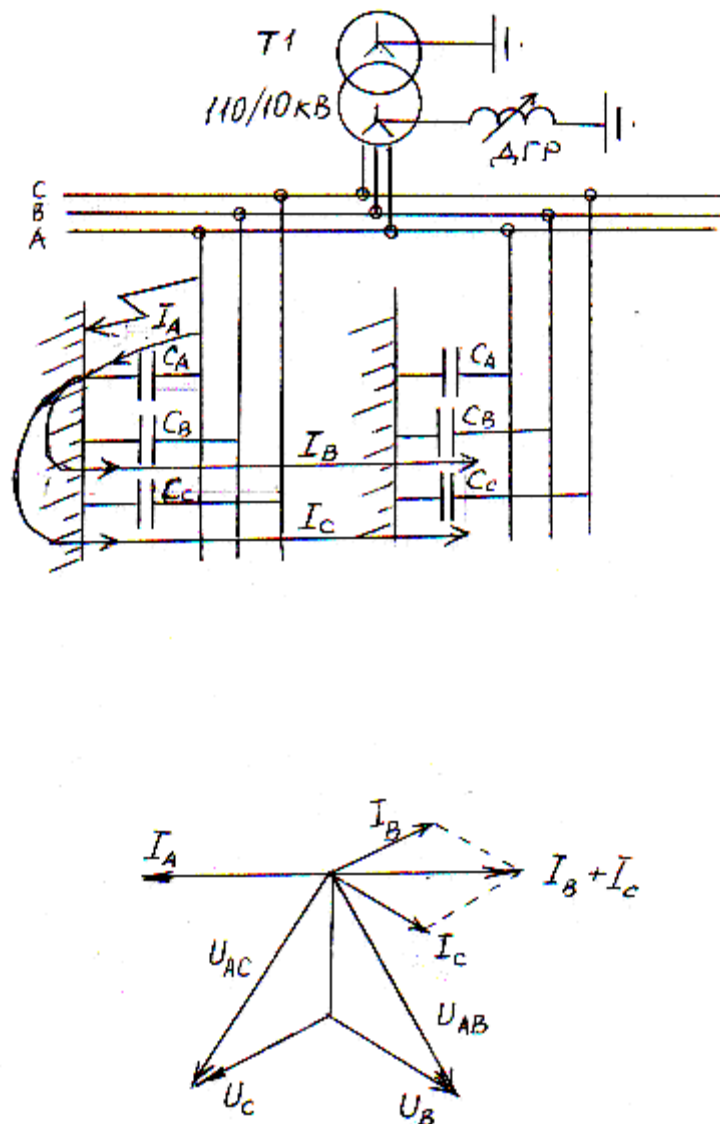
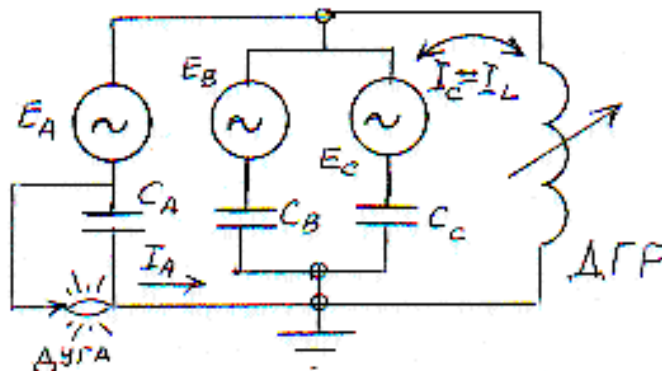


Рис. 9.4 – Схема однофазного замикання на землю та векторні діаграми

З урахуванням того, що мережа містить  $N$  ліній, то однофазний ємнісний струм  $I^{(1R)}$  замикання на землю кожної з ліній визначається сумою власних ємнісних струмів  $I_c$  усіх ліній, тобто

$$I^{(1K)} = 3 \sum_1^N I_c. \quad (9.6)$$

Якщо величина  $I^{(1K)}$  обчислена за формулою (9.6) перевищує значення 30А, 15А, 10А відповідно для мереж напругою 6 кВ, 10 кВ, 35 кВ, то для його обмеження на вказаних значеннях в ізолювану нейтраль встановлюють дугогасний реактор (ДГР) (рис.9.5) і мережа стає з компенсованою нейтраллю. Принцип зменшення струму через ушкоджену фазу пояснюється тим, що між ємностями неушкоджених фаз і ДГР виникає резонанс струмів. При цьому струм від фази А, що є джерелом для LC — контуру, в ідеальному випадку дорівнює нулю.



**Рис .9.5 – Схема компенсації ємнісних струмів при однофазному замиканні на землю**

### **9.3. Вибір типів захистів ліній**

Згідно з вимогами ПУЕ для ліній 6-35 кВ повинні бути передбачені захисти від міжфазних коротких замикань і від однофазних замикань на землю. Захист від міжфазних к. з. повинен бути в двофазному дворелейному виконанні, які включені у фази А и С по всій мережі. Захист від однофазних замикань на землю діє, як правило, на сигнал для персоналу. Допускається використовувати пристрій контролю ізоляції.

На одиноких радіальних і магістральних лініях з однобічним живленням варто застосовувати двоступінчастий струмовий захист від міжфазних к. з., тобто струмову відсічку без витримки часу і максимальний струмовий захист із витримкою часу. У випадку невиконання вимог ПУЕ за коефіцієнтом чутливості струмового захисту варто застосовувати комбіновані струмові захисти з пуском за мінімальною напругою, з пуском за зворотними складовими струму або напруги.

На одиноких послідовних лініях, тобто лініях, які складаються з декількох послідовних ділянок з однобічним живленням, варто застосовувати три- або чотириступеневий струмовий захист на головній ділянці лінії, або комбіновані струмові захисти з пуском за мінімальною напругою, з пуском за зворотними складовими струму або напруги.

На одиноких лініях із двостороннім живленням, а також лініях, що входять у кільцеву мережу з одною точкою живлення, варто застосовувати захисти аналогічні лініям з однобічним живленням, виконуючи їх при необхідності з реле напрямку потужності.

На паралельних лініях з однобічним живленням підключених до загального вимикача встановлюють захисти аналогічні одиночним лініям. При невиконанні вимог ПУЕ за коефіцієнтом чутливості варто застосовувати поперечний диференціальний захист без витримки часу.

На паралельних лініях зі своїми вимикачами, як правило, на прийомному кінці лінії необхідний поперечний диференціальний спрямований струмовий захист. Радіальні лінії з трансформатором на кінці допускається захищати запобіжником.

#### 9.4. Захист нульової послідовності ліній

Для захисту ліній 6-35 кВ від однофазних замикань на землю ПУЕ допускає застосування пристроїв контролю ізоляції фаз відносно землі. Пристрій являє собою три фазних вольтметра, нейтраль «зірки» яких заземлена. При аварії напруга на ушкодженій фазі зменшується, а на нормальних підвищується. Для повітряних ліній застосовують неселективний захист напруги нульової послідовності. При цьому ушкоджена лінія визначається шляхом почергового відключення ліній від живлення, тобто методом виключення, коли захист не спрацьовує при відключенні ушкодженої лінії. Схема захисту (рис. 9.6) містить наступні елементи.

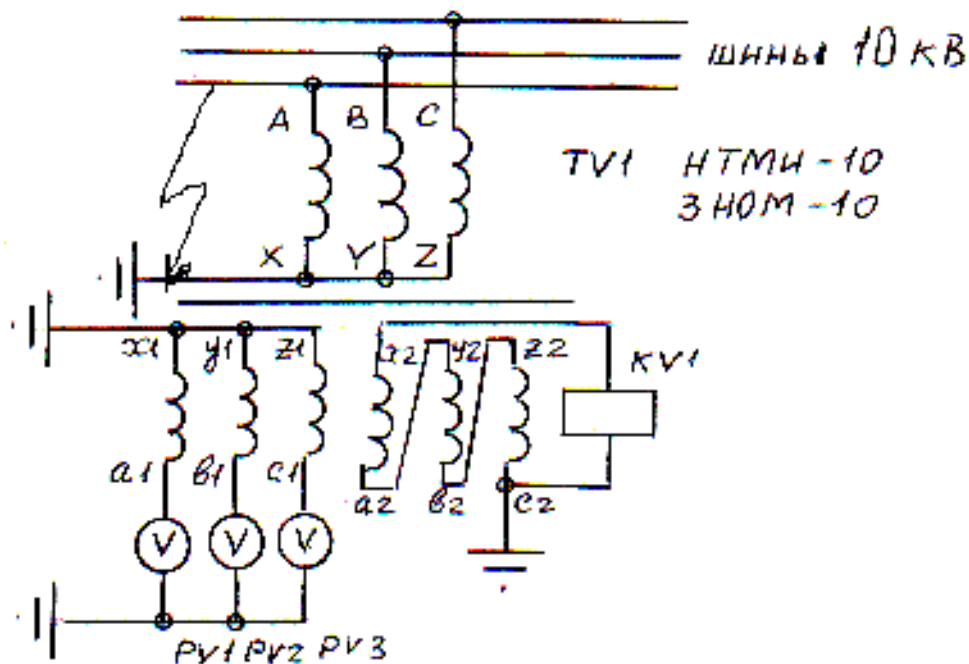
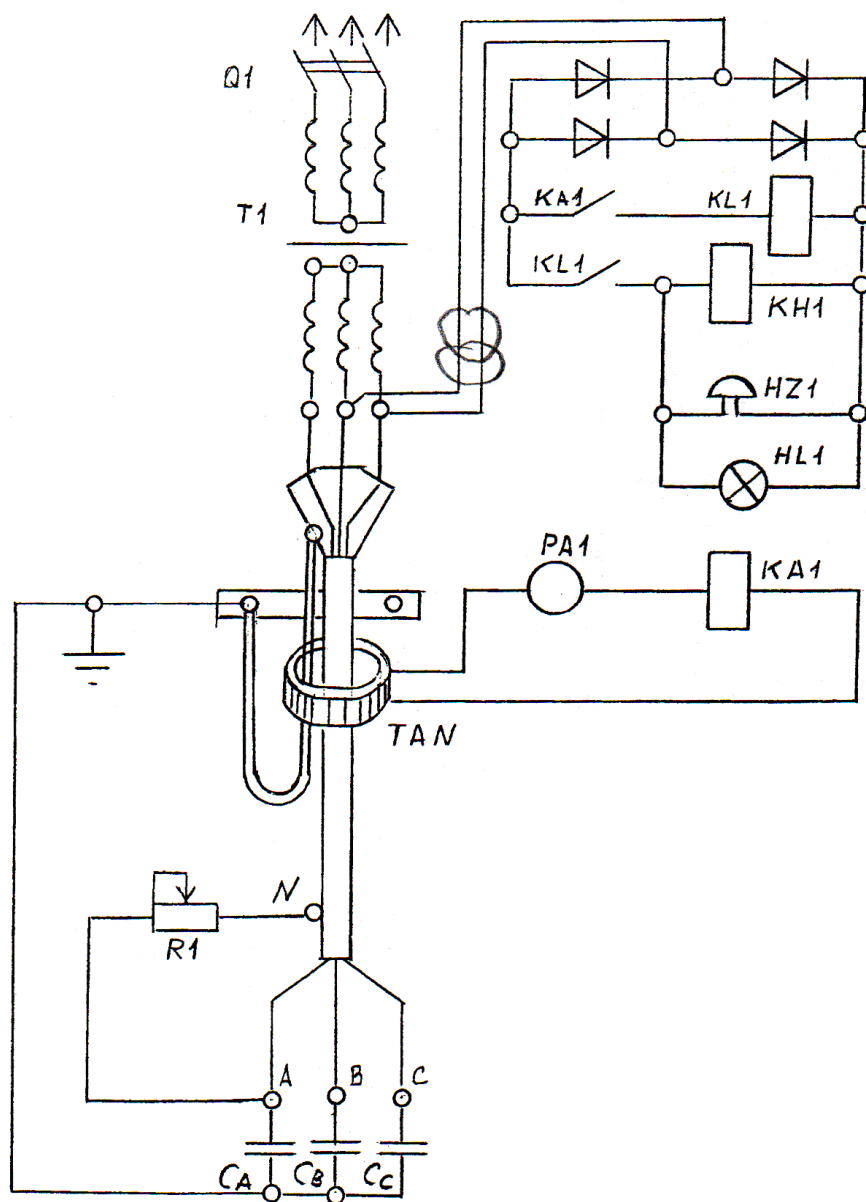


Рис. 9.6 – Схема захисту за напругою зворотної послідовності

Трансформатор напруги, наприклад типу НТМИ-10 із трьома трифазними обмотками: первинна включена в «зірку»; перша вторинна з'єднана в «зірку», до якої підключають вольтметри і лічильники електроенергії; друга вторинна включена за схемою розімкнутого «трикутника», у розрив якого включено реле KV1 типу РН-50. У нормальному режимі векторна сума ЕРС обмоток розімкнутого трикутника дорівнює нулю, тобто  $U_{ax} + U_{by} + U_{cz} = 0$  і реле KV1 не спрацьовує. При замиканні, наприклад, фази А на землю первинна обмотка АХ трансформатора напруги виявляється зашунтованою та її струм дорівнює нулю. При цьому ЕРС вторинної обмотки ах дорівнює нулю і сума двох ЕРС дорівнює  $U_{by} + U_{cz} = 100\text{В}$ , реле KV1 спрацьовує і діє на сигнал.

Для селективного захисту кабельних ліній використовують струмовий захист нульової послідовності (СЗНП), що встановлюють на кожній кабельній лінії. СЗНП містить (рис. 9.7) трансформатор струму нульової послідовності (ТНП), до вторинної обмотки якого підключене струмове реле КА1.



**Рис. 9.7 – Схема захисту від однофазних замикань на землю**

Первинною обмоткою ТНП є трифазний кабель, пропущений через вікно сердечника ТНП. Металева захисна оболонка кабелю з'єднується з заземлювальною шиною на підстанції гнучким провідником, пропущеним через вікно сердечника ТНП як показано на рис 9.7.

У нормальному режимі, а також у режимах дво- і трифазних к. з. векторна сума миттєвих значень фазних струмів і створених ними магнітних потоків дорівнює нулю, тобто навколо кабелю змінне магнітне поле відсутнє і у вторинній котушці ТНП не індукується ЕРС, тобто дорівнює нулю і струмове реле КА1 не працює.

При однофазному замиканні жили кабелю на його металеву оболонку з'являється струм ємнісного характеру, що протікає по колу: ушкоджена жила через ізоляцію — оболонка кабелю — провідник, що заземлює - заземлювальна шина - земля. Ємнісні струми кожного з провідників створюють магнітні потоки рівні за величиною і протилежні за напрямком, векторна сума яких

$\Phi_{\text{жили}} - \Phi_{\text{оболочки}} + \Phi_{\text{зазем.пр.}}$  більше нуля. При цьому в біля кабельному просторі з'являється змінний магнітний потік, що індукуює у вторинній обмотці ТНП ЕРС і реле КА1 спрацює.

Вторинний струм ТНП залежить від величини ємнісного струму однофазного замикання на землю пропорційно коефіцієнтові трансформації ТНП, тобто

$$K_{\text{ТНП}} = I^{(1K)} / I_2 = 100.$$

При невеликій довжині мережі зменшується загальна ємність фаз ліній щодо землі і зменшується  $I^{(1K)}$ ,  $I_2$  і реле КА1 може не спрацювати. У цьому випадку застосовують спеціальні реле з транзисторними підсилювачами, схема одного з них типу УСЗ-2/2 наведена на рис.9.8.

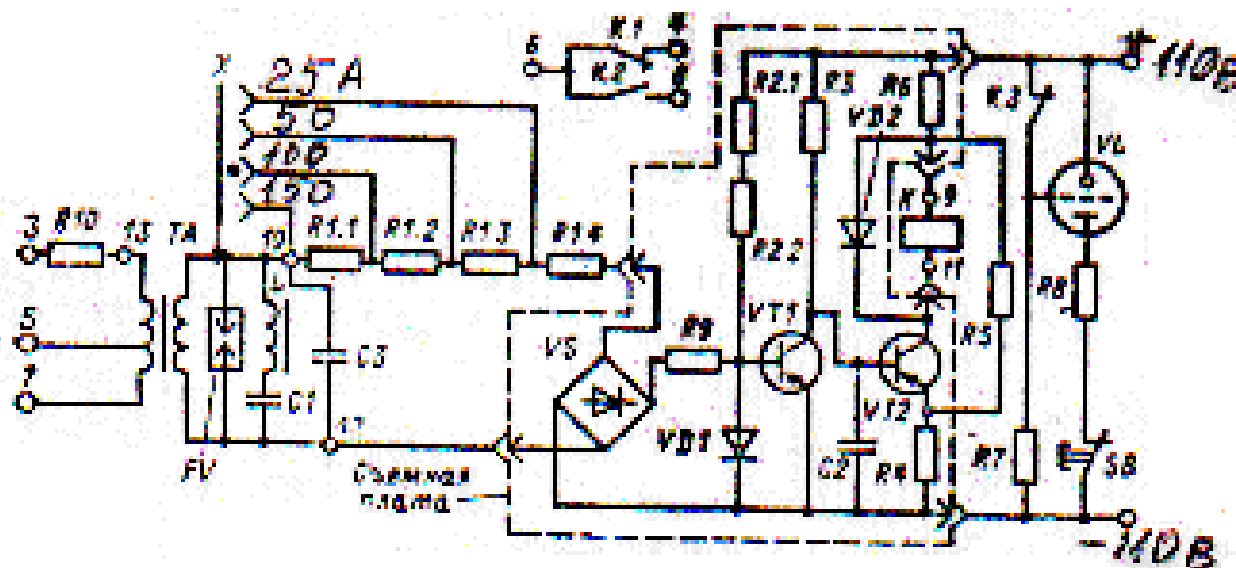


Рис. 9.8 – Схема реле УСЗ-2/2 для захисту від однофазних замикань на землю

У нормальному режимі струм  $I_2 = 0$ , на діоді VD1 немає позитивного спаду напруги і транзистор VT1 типу р-п-р відкритий струмом бази через резистори R2.1 і R2.2. Транзистор VT2 закритий, тому що його база з'єднана з емітером через відкритий VT1.

При однофазному замиканні на землю з'являються струм  $I_2$  від ТНП, створює позитивний спад напруги на базі VT1 і закриває його. Через базо-емітерний перехід транзистора VT2 протікає струм, відкриваючи його і включаючи котушку

виконавчого реле К. Контакт реле включає сигналізацію і тиратрон VL, який можна виключити кнопкою SB. Мінімальний струм спрацьовування реле УСЗ-2/2 дорівнює  $I_2 = 20\text{mA}$ .

Уставка спрацьовування захисту нульової послідовності визначається за формулою

$$I_{\text{ЗНП}} = 1,2 \cdot I_E \cdot \ell_{\text{кл}}, \quad (9.7)$$

де  $I_E$  — власний питомий ємнісний струм лінії, що залежить від її довжини, перерізу, напруги та визначається за довідниками, А/км;

$\ell_{KL}$  — довжина кабельної лінії, к.М.

Перевірка захисту на виконання вимог ПУЕ за коефіцієнтом чутливості виконується за умовою:

$$K_{ЗНП}^{ЧУВ} = \frac{I^{(1K)} - I_E \cdot \ell_{KL}}{I_{ЗНП}} > 1,5, \quad (9.8)$$

де  $I^{(1K)}$  — струм однофазного замикання на землю, що залежить від повної ємності мережі щодо землі за формулою (9.6).

За величиною  $I_{ЗНП}$  визначається вторинний струм  $I_2$  трансформатора нульової послідовності типу ТЗЛ за допомогою графіка на рис. 9.9. За величиною  $I_2$  приймається тип реле нульової послідовності за умовою  $I_2 > I_{сп}^p$  — струм спрацьовування реле.

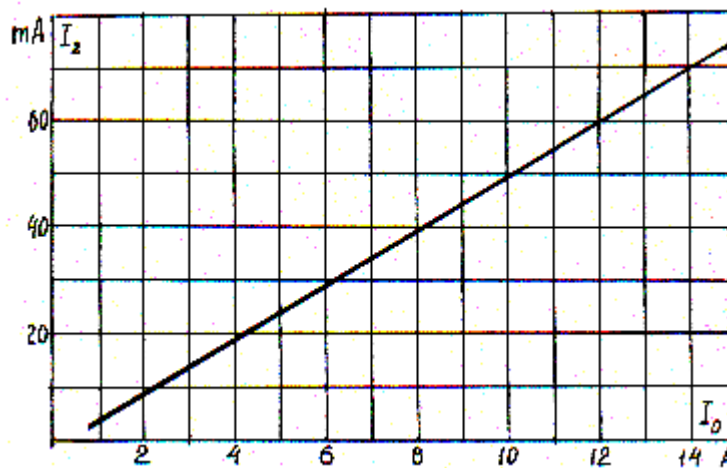


Рис. 9.9 – Залежність вторинного струму трансформатора нульової послідовності від струму замикання на землю

## 9.5. Захист одиночних ліній

Для радіальних і магістральних ліній 6-35 кВ ПУЕ вимагає установку двоступінчастого струмового захисту від міжфазних к. з. з дією на відключення і захист нульової послідовності від однофазних замикань на землю з дією на сигналізацію.

Перша ступінь струмового захисту — струмова відсічка без витримки часу повинна захищати від міжфазних к. з. тільки лінію і допускається захищати первинну обмотку трансформатора, підключеного до лінії. Вона діє без витримки часу на відключення лінії від мережі.

Друга ступінь струмового захисту — максимальний струмовий захист (МСЗ) з витримкою часу забезпечує резервування неспрацьовування (відмовлення) струмової відсічки і запобіжника, що захищає підключений до

лінії трансформатор 10/0,4 кВ від внутрішніх і зовнішніх к. з. на низькій стороні.

Уставка  $I_{10}$  спрацьовування струмової відсічки (СВ) повинна розраховуватися виходячи з наступних умов: 1) СВ захищає тільки лінію по всій її довжині і частково трансформатор; 2) СВ не повинна спрацьовувати при к. з. на низькій стороні підключеного до лінії трансформатора, а також від кидків струмів при його включенні, тобто

$$I_{TO} = 1,2I_{\min}^{(3K)}, \quad (9.9)$$

де  $I_{\min}^{(3K)}$  — струм у лінії при трифазному к. з. на виводах обмотки НН трансформатора.

Перевірка струмової відсічки на виконання вимог ПУЕ:

1) за коефіцієнтом чутливості:

$$K_{\text{чувст}}^{TO} = \frac{I^{2K}}{I_{TO}} > 2, \quad (9.10)$$

де  $I^{(2K)}$  — струм у лінії при двофазному к. з. наприкінці лінії.

2) на неспрацьовування (відстройку) від кидків струму при включенні трансформаторів під напругу лінії

$$I_{TO} > 2 \sum I_{BH}^{HOM}, \quad (9.11)$$

де  $\sum I_{BH}^{HOM}$  — сума номінальних струмів обмоток ВН трансформаторів, підключених до магістральної лінії.

Уставка спрацьовування МСЗ за струмом вибирається з умови її спрацьовування при к. з. на стороні обмотки НН трансформатора, тобто

$$I_{MTЗ} = \frac{1,7 \cdot K_{CЗП} \sum I_{BH}^{HOM}}{kB}, \quad (9.12)$$

де  $K_{CЗП} = 2-5$  — коефіцієнт самозапуску високовольтних двигунів, якщо їх сумарна встановлена потужність порівнянна з потужністю трансформатора;

$K_B = 0.8$  — коефіцієнт повернення струмових реле.

Перевірка відповідності МСЗ вимозі ПУЕ за коефіцієнтом чутливості виконується за умовою:

$$K_{\text{чувст}}^{MTЗ} = \frac{I^{1K}}{I_{MTЗ}} = \frac{2 \cdot I^{(3K)}}{3 \cdot I_{MTЗ}} > 1,2, \quad (9.13)$$

де  $I^{(1K)}, I^{(3K)}$  — струми в лінії при одно- і трифазних к. з. на виводах обмоток НН трансформатора, підключеного до лінії.

Уставка витримки часу МСЗ визначається з умов зазначених у ПУЕ:



- 1) повинна бути менше часу термостійкості  $t_t$  ізоляції кабелю, тобто інтервалу часу дії струмів к. з., при якому температура жил кабелю не перевищує припустимої температури  $90^\circ$  і визначається за формулою

$$t_t = \left( \frac{2F}{0,01 \cdot I_{\text{МАКС}}^{(3K)}} \right)^2 [\text{сек}], \quad (9.14)$$

де  $F$ — прийнятий переріз кабелю,  $\text{мм}^2$ ;

$F_{\text{МАКС}}^{(3K)}$ — струм у лінії при к. з. на початку лінії, А;

- 2) повинна в три рази перевищувати час  $t_{\text{сп}}^{\text{пред}}$  спрацьовування запобіжника на стороні ВН трансформатора, підключеного до лінії, що визначається за його захисною характеристикою.

З огляду на вищевикладене витримка часу МСЗ вибирається з умови:

$$t_t > t_{\text{МТЗ}} > 3t_{\text{сп}}^{\text{пред}}. \quad (9.15)$$

Для перевірки селективності струмових захистів будується карта селективності, за якою визначається зона дії СВ і МСЗ, як показано на рис.5.10.

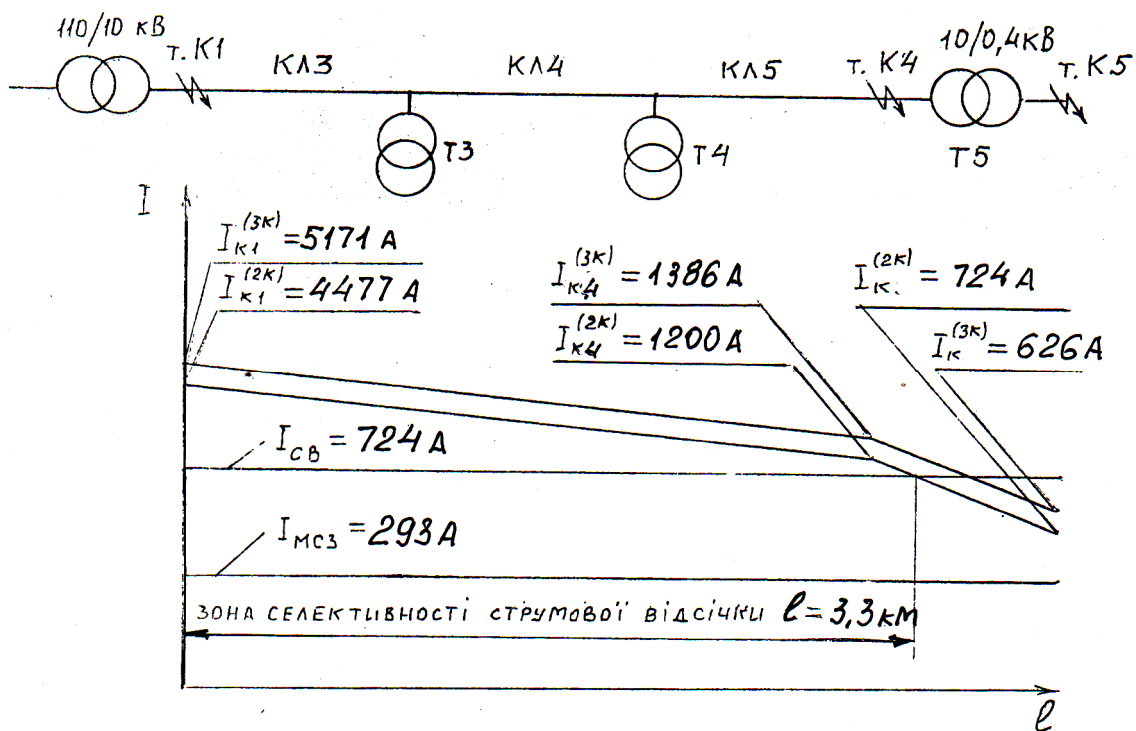


Рис. 9.10 – Визначення зони селективності струмової відсічки

Розрахунок і вибір захисту лінії від однофазних замикань на землю розглянутий у 9.4.

Після розрахунку уставок спрацьовування захистів необхідна розробка електричної схеми для їхньої реалізації. Згідно з вимогами ПУЕ струмовий захист лінії повинен виконуватися в двофазному дворелейному виконанні.

Трансформатори струму і струмові реле включаються за схемою «неповної зірки».

Первинний стандартизований струм  $I_1^{TT}$  трансформатора струму вибирається за умовою  $I_1^{TT} \succ I_p^{MAKC}$ , а його коефіцієнт трансформації  $K_{TT} = I_1^{TT} / 5$ .

Двоступінчастий струмовий захист лінії може бути побудований на комплектних пристроях захисту типу КЗ-12 на постійному або випрямленому оперативному струмі, типу КЗ-37 на змінному оперативному струмі, на індукційному струмовому реле типу РТ-80.

Вибір типу реле серії РТ-40 виконується за умовою  $I_{cp}^{min} \prec I_{cp}^{PTO} \prec I_{cp}^{MAKC}$ , де  $I_{cp}^{PTO}$  — уставка спрацьовування реле струмової відсічки (або МСЗ) обумовлена за формулою  $I_{cp}^{PTO} = I_{TO} / K_{TT}$ . Струмові реле РТ-40 дозволяють плавно регулювати уставку спрацьовування в діапазоні  $I_{cp}^{MAKC} | I_{cp}^{min} = 4$ . Наприклад, для реле РТ-40/10 при послідовному включенні котушок  $I_{cp} = 5 \div 10 A$ , при паралельному  $I_{cp} = 10 - 20 A$ ,  $m.e. 20 / 5 = 4$ . Для реле РТ-40/20 діапазон уставок  $I_{cp} = 10 - 40 A$ .

Індукційне реле струму, наприклад РТ-85/1 реалізує двоступінчастий струмовий захист. Максимальний струмовий захист реалізується на індукційному елементі реле, коли при струмі спрацьовування рамка з обертовим диском повертається і вісь диска входить у зачеплення з важелем, що піднімає контакт у міру обертання диска, тобто з витримкою часу. Розрахунковий струм (уставка) спрацьовування індукційного елемента реле РТ-85/1 реалізуючого МСЗ визначається аналогічно реле РТ-40, тобто  $I_{MT3}^{расч} = I_{MT3} / K_{TT}$ . Розрахункове значення треба округлити до цілого числа, тому що уставка спрацьовування індукційного елемента регулюється ступінчато зміною кількості витків котушки, тобто прийнята уставка може бути  $I_{MT3}^{прин} = 5, 6, 7, 8, 9, 10 A$ .

Струмова відсічка реалізується на електромагнітному елементі реле РТ-85/1. Розрахункова уставка спрацьовування електромагнітного елемента  $I_{TO}^{расч} = I_{TO} / K_{TT}$ . У реле РТ-85/1 уставка спрацьовування електромагнітного елемента встановлюється в значеннях, кратних уставці спрацьовування індукційного елемента реле, тобто  $I_{TO}^{кр} / I_{MT3} = 2, 4, 6, 8$ . Тоді для визначення уставки електромагнітного елемента в кратному числі треба  $I_{TO}^{кр} = I_{TO}^{прин}$  й отримане число округлити в меншу сторону.

За заданою у довідниках споживаної потужності  $S_{pm}$  струмових реле і розрахункових струмах  $I_{cp}$  спрацьовування визначаємо опір котушок  $Z_{PT} = S_{PT} / I_{cp}^2$ . Розрахунковий опір навантаження вторинної обмотки трансформатора струму  $Z_2 = \sum Z_{PT} + Z_{np}$ , де  $Z_{np}$  — опір мідних проводів з перерізом  $2,5 \text{ мм}^2$ ,

$$Z_{np} = 0,007 \cdot \ell_{np} - \text{довжина проводів у метрах.}$$

Після визначення опору навантаження трансформатор струму перевіряють на 10%-ую похибку. Умова перевірки: 1)  $Z_z \leq Z_z^{don}$ , тобто розрахунковий опір повинний бути менше припустимого на таблиці; 2) розрахункова кратність

первинного струму — відношення максимального трифазного струму к. з. до номінального первинного — менше припустимої, тобто  $m_p = I_{\text{МАКС}}^{(3K)} / I_{\text{НОМ}} < m^{\text{доп}}$ .

Якщо одне з умов не виконуються, то пропорційно зменшується припустима величина другої умови. Якщо і це не виконується, то приймають трансформатор струму з більшим номінальним первинним струмом, щоб зменшити кратність первинного струму.

## 9.6. Захист паралельних ліній

Паралельне включення двох ліній застосовують для підвищення передавальної потужності. Паралельні лінії бувають двох типів: із загальним вимикачем (див. рис.9.1., лінія №6) і з роздільними вимикачами (див. рис. 9.1. лінії 2.1 і 2.2). ПУЕ вимагає для них побудови захистів аналогічно одиночним лініям з однобічним живленням, тобто струмова відсічка і максимальний струмовий захист. У випадку, якщо коефіцієнт чутливості струмової відсічки менше двох, то ПУЕ рекомендує застосовувати поперечний диференціальний захист (ПДЗ).

Схема ПДЗ (рис.9.11) містить два однакових трансформатори струму ТА1, ТА2, до вторинних обмоток яких, з'єднаних за схемою «вісімки» на різницю струмів підключене струмове реле КА1.

У нормальному режимі і при зовнішньому к. з. (точка КЗ) по котушці реле КА1 протікає струм небалансу  $I_{\text{НБ}} = I_2^{\text{ТА1}} - I_2^{\text{ТА2}} > 0$ , викликаний похибками самих трансформаторів, величина якого визначається за формулою

$$I_{\text{НБ}} = \frac{(\gamma_{\text{ТА1}} + \gamma_{\text{ТА2}})}{100 \cdot 2K_{\text{ТА}}} I^{3K}, \quad (9.15)$$

де  $\gamma_{\text{ТА1}} = \gamma_{\text{ТА2}} = 10\%$  — припустима похибка ТА1, ТА2;

$I^{(3K)}$  — величина струму при трифазному к. з. на початку паралельної лінії, тому поділяється на 2;

$K_{\text{ТА}}$  — коефіцієнт трансформації ТА1, ТА2.

При міжфазному к. з. у точці К1 (рис. 9.11) струм у лінії КЛ1 росте, а в лінії КЛ2 падає до нуля. Різниця вторинних струмів ТА1, ТА2 перевищує струм небалансу і реле КА3 спрацьовує. Уставка спрацьовування КА3 визначається за формулою  $I_{\text{сп}}^{\text{КА3}} = 1,2I_{\text{НБ}}$ .

При переміщенні точки к. з. від міста установки захисту струм в ушкодженій лінії КЛ1 зменшується, а в нормальній лінії КЛ2 росте. При цьому при між- фазному к. з. у точці КЗ наприкінці лінії струми в лініях мало відрізняються один від одного за величиною, а їхня різниця  $I_2^{\text{ТА1}} - I_2^{\text{ТА2}} < I_{\text{сп}}^{\text{КА3}}$  і

КАЗ не працює. У такий спосіб схема ПДЗ не захищає зону наприкінці лінії, яка називається «мертвою» зоною. Довжина «мертвої» зони визначається графічно (рис. 9.11 ) або за формулою

$$\ell_{m3} = \frac{2\ell_n \cdot K_{TA} I_{cp}^{KA3}}{I^{(3K)}}, \quad (9.16)$$

де  $\ell_n$  — довжина паралельної лінії.

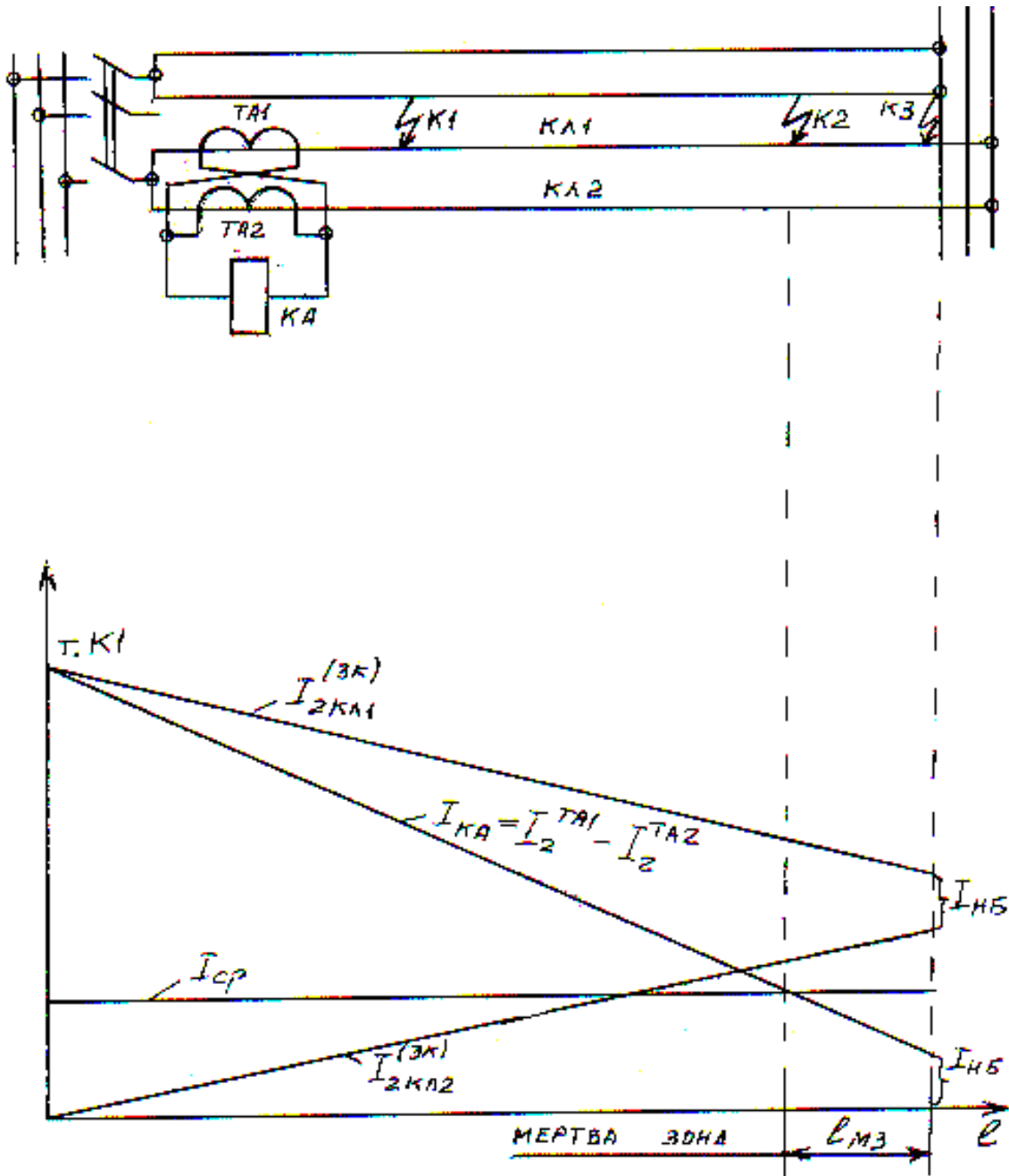


Рис. 9.11 – Схема поперечного диференціального захисту ліній

Недоліки ПДЗ: 1) не захищає лінію по всій довжині; 2) при виводі однієї з ліній у ремонт захист треба відключати; 3) захист не визначає ушкоджену лінію, тобто відключає обидві лінії.

Для паралельної лінії з роздільними вимикачами згідно з вимогами ПУЕ на прийомному кінці двох паралельних ліній, як правило, повинен бути використаний поперечний диференціальний спрямований захист (ПДСЗ). На живильному початку лінії встановлюються захисти аналогічні одиночним лініям. У випадку, якщо коефіцієнт чутливості струмової відсічки менше двох, то ПУЕ рекомендує використовувати в якості основного або додаткового захисту на живильному початку лінії ПДСЗ. Достоїнство ПДСЗ — визначає ушкоджену лінію з двох паралельних і відключає саме її. ПДСЗ будують на основі реле напрямку потужності типу РБМ.

Принцип дії схеми ПДСЗ (рис.9.12) на живильному початку лінії. При міжфазному к. з. на лінії КЛ1 вторинний струм  $TA2$  більше  $TA1$ , тобто  $I_2^{TA2} > I_2^{TA1}$ . Струм різниці втікає в клему 5 струмової котушки реле напрямку потужності реле  $KW1$ , контакт якого при спрацьовуванні замикає коло відключення  $Q1$ . При к. з. на лінії КЛ2 навпаки  $I_2^{TA1} > I_2^{TA2}$ . Струм різниці втікає в клему 6 струмової котушки  $KW1$ , контакт якого замикає коло відключення  $Q2$ .

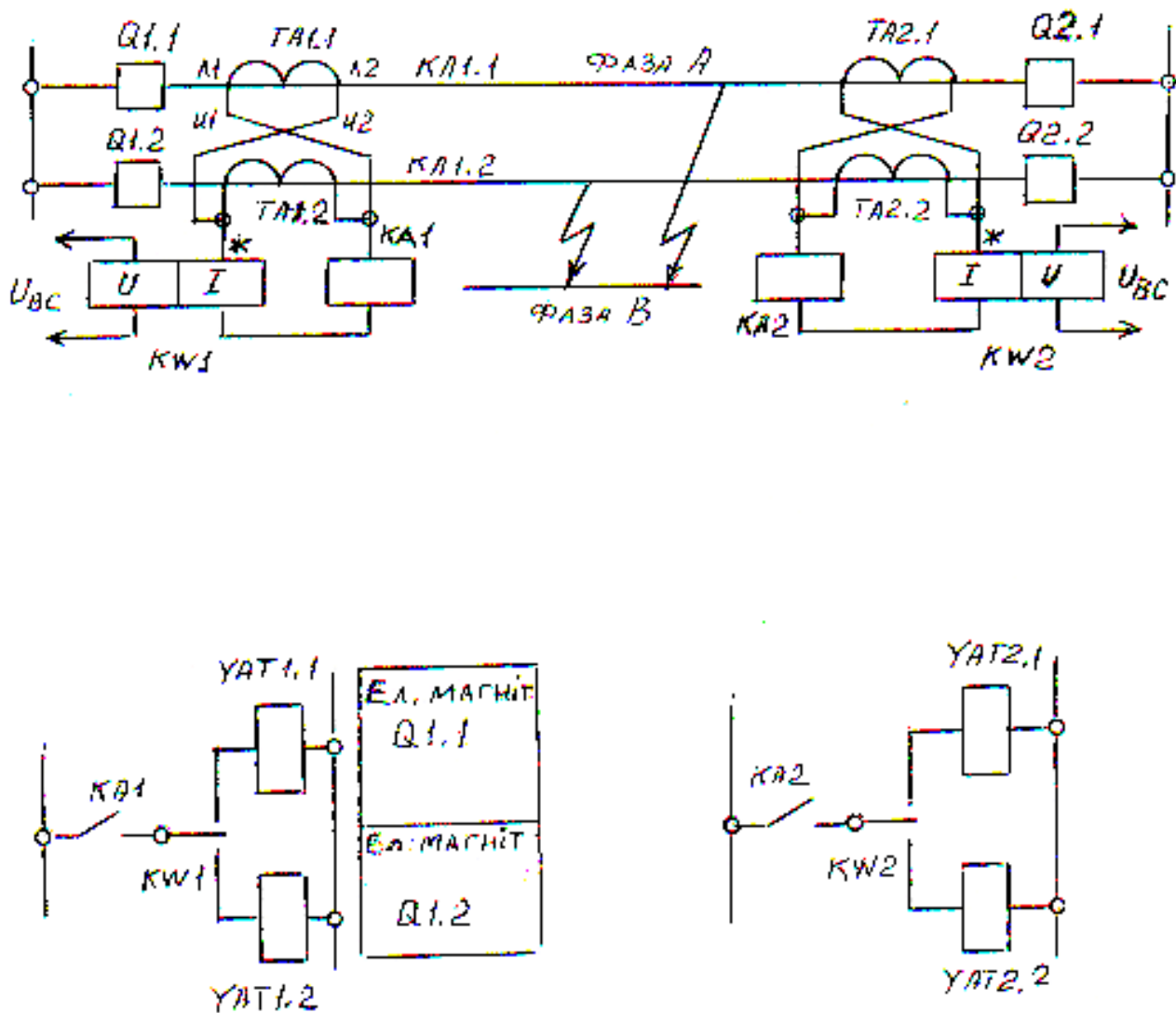


Рис. 9.12 – Схема поперечного диференціального напрямленого захисту

Принцип дії схеми на прийомному кінці лінії. При міжфазному к. з. на КЛ1 первинний струм к. з. втікає в клему Л1 ТА3 і Л2 ТА4. Вторинні струми складаються і струм суми втікає в клему 6 струмової котушки реле KW2, контакт якого відключає Q3. При КЛ2 первинний струм втікає в клему Л1 ТА4 і Л2 ТА3. Струм їхньої суми втікає в клему 5 струмової котушки реле KW2, контакт якого відключає Q4. Таким чином, ушкоджена лінія відключається вимикачами з обох сторін.

Уставки спрацьовування реле потужності KW1, KW2 не розраховуються. Мінімальні параметри спрацьовування реле потужності за струмом 1 А и за напругою 50 В.

При к. з. поблизу шин підстанції відбувається зниження рівня напруги, тому необхідно перевірку рівня напруги за формулою

$$U_{\min}^{(3K)} = I^{(3K)} \cdot Z_{\text{л}} = \frac{UZ_{\text{л}}}{\sqrt{3}(Z_{\text{н}} + Z_{\text{с}} + Z_{\text{т}}) \cdot K_{\text{ТН}}}, \quad (9.17)$$

де  $U$  — лінійна напруга на шинах підстанції, кВ;  
 $Z_{\text{л}}, Z_{\text{с}}, Z_{\text{т}}$  — повні опори лінії, енергосистеми і трансформатора живлення лінії, Ом;  
 $K_{\text{ТН}}$  — коефіцієнт трансформації трансформатора напруги.

## 9.7. Захист послідовних ліній

Послідовні лінії містять найчастіше дві ділянки, тобто головна ділянка (лінія Л.1.1 на рис. 9.13) підключена до джерела живлення живить розподільний пункт (підстанцію), від якого відходить лінія Л1.2, що живить підстанцію 10/0.4 кВ.

Захист головної ділянки лінії будується триступінчастим: 1-й ступінь — струмова відсічка без витримки часу, 2-й ступінь — струмова відсічка з витримкою часу, 3-й ступінь — максимальний струмовий захист із витримкою часу. Розрахунок уставок спрацьовування ступеней струмових захистів розглянемо на прикладі рис. 9.13. Уставка спрацьовування 1-го ступеня  $I_{\text{н\delta}}^I = 1,2I_{\text{К2}}^{(3K)}$ , де  $I_{\text{К2}}^{(3K)}$  — струм у лінії Л1.1 при трифазному к. з. у точці К2. Коефіцієнт чутливості 1-го ступеня  $K_{\text{чувств1}} = (I_{\text{К2}}^{(2K)} / I_{\text{сп}}^I) > 1,5$ , де  $I_{\text{К2}}^{(2K)}$  — струм на ділянці Л1.1 при двофазному к. з. у точці К2.

Уставка спрацьовування 2-го ступеня  $I_{\text{н\delta}}^{II} = 1,2I_{\text{К3}}^{(3K)}$ , де  $I_{\text{К3}}^{(3K)}$  — струм на ділянці КЛ1.1 при трифазному к. з. у точці К3. Витримка часу спрацьовування 2-го ступеня  $t^{II} = t^I + t_{\text{сел}}$ , де  $t^I = 0,3$  сек — власний час спрацьовування 1-го ступеня;  $t_{\text{сел}} = 0,4 \text{ сек}$  — ступінь селективності. Коефіцієнт чутливості 2-го ступеня  $K_{\text{чув.я}} = (I_{\text{К3}}^{(2K)} / I_{\text{сп}}^{II}) > 1,2$ , де  $I_{\text{К3}}^{(2K)}$  — струм на ділянці Л.1.1 при двофазному к. з. у точці К3.

Уставка спрацьовування 3-го ступеня  $I_{cp}^{III} = 1,4I_{РАБ}^{МАКС}$ , де  $I_{РАБ}^{МАКС}$  — максимальний робочий струм на ділянці Л1.1. Витримка часу при спрацьовуванні 3-го ступеня

$t^{III} = t^{II} + t_{сел} = 0,5 + 0,4 = 0,9 \text{ сек.}$  Коефіцієнт чутливості  $K_{чув.3} = (I_{K4}^{(2R)} / I_{cp}^{III}) > 1,2$  де  $I_{K4}^{(2K)}$  — струм на ділянці КЛ1 при двофазному к. з у точці К4.

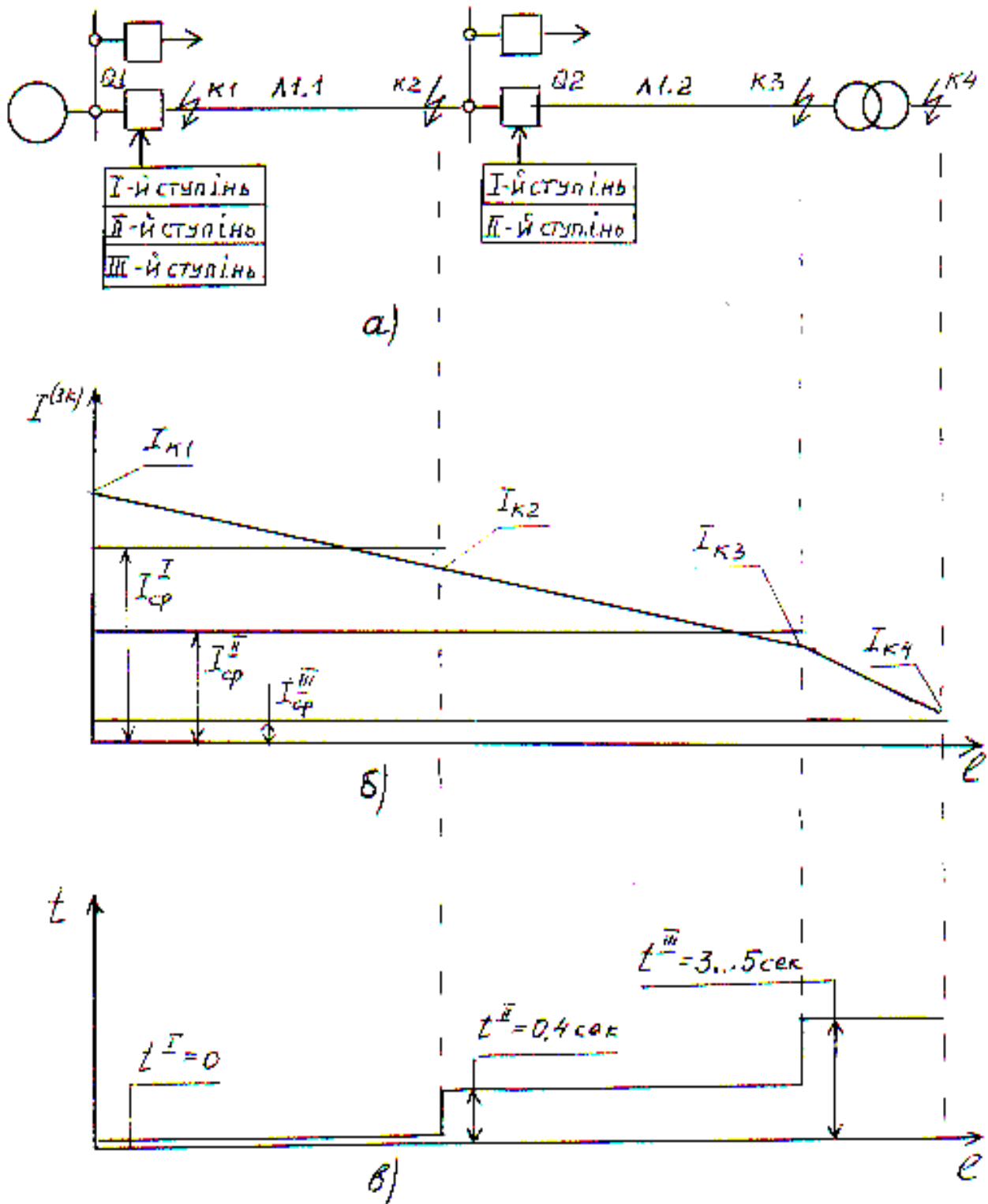


Рис. 9.13- Схема захисту послідовної лінії

### 9.8. Захист ліній за мінімальною напругою

Захист застосовується, якщо простий струмовий захист не забезпечує необхідного коефіцієнта чутливості. Принцип дії захисту заснований на тому, що контролюють не тільки величину аварійного струму, але і величину залишкової напруги  $U_{ост}$  на шинах підстанції. В міру наближення точки к. з. до шин підстанції величина  $U_{ост}$  зменшується і контролюється реле напруги типу РН-50. Необхідність контролю  $U_{ост}$  виникає і при побудові дистанційного захисту, принцип дії якого розглянутий нижче, а також при побудові струмового спрямованого захисту на основі реле типу РБМ.

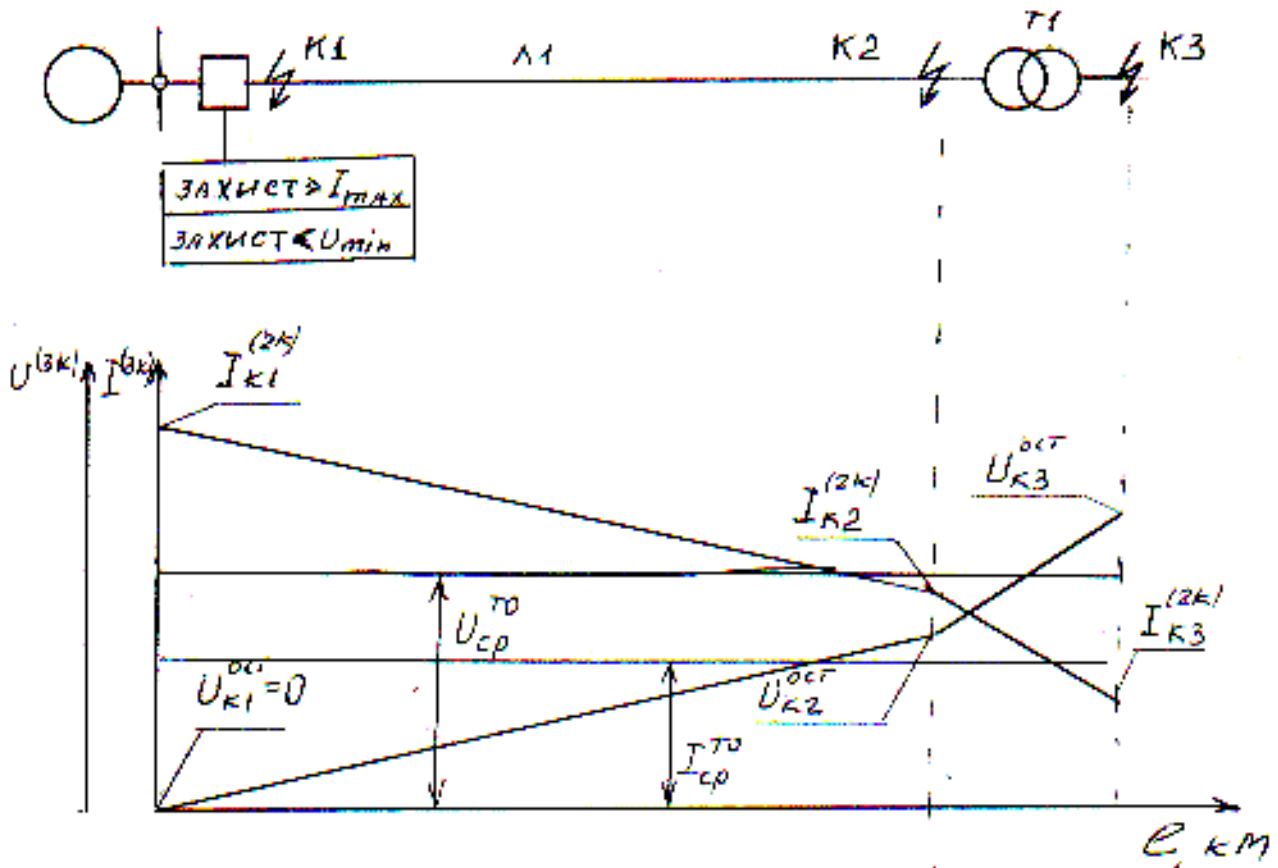


Рис. 9.14- Розрахункова схема захисту за мінімальною напругою

При короткому замиканні в т. К1 поблизу шин підстанції (рис. 9.14)  $U_{ост}^{(3K)} = 0$ , а в міру переміщення т. К2 і К3  $U_{ост}$  зростає. При к. з. у т. К2 і К3  $U_{ост}^{(3K)} = \sqrt{3}I_{K2}^{(3K)}\sqrt{R_{л1}^2 + X_{л1}^2}$ ;  $U_{ост}^{(3K)} = \sqrt{3}I_{K3}^{(3K)}\sqrt{(R_{л1} + R_{T1})^2 + (X_{л1} + X_{T1})^2}$ , де  $I^{(3K)}$  — струм на початку лінії при трифазному к. з. у відповідній точці к. з.:  $R_{л1}$ ,  $R_{T1}$ ,  $X_{л1}$ ,  $X_{T1}$  — активні і реактивні опори лінії і трансформатора.

Уставка спрацьовування струмової відсічки і максимального струмового захисту розраховується з точки зору забезпечення необхідного коефіцієнта чутливості, тобто  $I_{сп}^{TO} = I_{K2}^{(2K)} / 2$ ;  $I_{сп}^{MT3} = I_{РАБ}^{МАКС} / 1.2$ .

Уставка спрацьовування реле напруги розраховується  $U_{сп} = U_{ост} / (K_{TV} \cdot 1.5)$ , де  $K_{TV}$  — коефіцієнт трансформації TV (рис.9.15). Принцип роботи схеми на рис.



9.15 полягає у наступному: у нормальному режимі якорі електромагнітів реле напруги KV1 і KV2 притягнуті і їхні контакти розімкнуті. При к. з. напруга зменшується і якорі відпадають, контакти змикаються в колі котушки реле KL1.

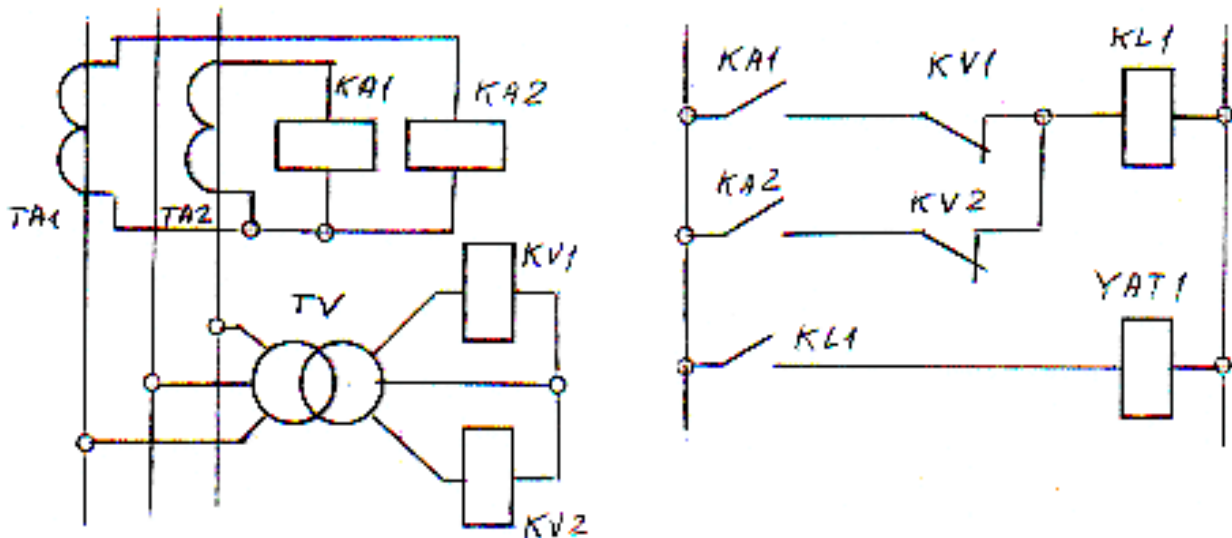


Рис. 9.15 – Схема захисту за мінімальною напругою

## 10. ЗАХИСТ ЛІНІЙ 110-330 кВ

### 10.1. Вибір типів захистів ліній

Вибір типів захистів ліній розробляється згідно з вимогами ПУЕ. Захист ліній будується за ступінчатим принципом від міжфазних к. з. і однофазних к. з. на землю, оскільки мережі 110 кВ виконані з глухозаземленою нейтраллю. Тип захисту визначається типом лінії. Для одиноких радіальних ліній з одностороннім живленням від однофазних і міжфазних к. з. застосовують ступінчаті струмові захисти. При цьому трансформатори струму і струмові реле включають за схемою повної зірки. Якщо коефіцієнт чутливості струмових захистів менше 1,5, то застосовують струмові захисти з пуском за мінімальною напругою, з пуском за складовими струмів або напруги зворотної і нульової послідовності.

Для захисту магістральних ліній і ліній з відгалуженнями від міжфазних к. з. застосовують ступінчаті дистанційні захисти, а від однофазних к. з. на землю - захисти нульової послідовності. При цьому обов'язково наявність резервного захисту у вигляді струмової відсічки з витримкою часу.

Для захисту кільцевих ліній і ліній із двостороннім живленням застосовують захисти аналогічні магістральним лініям. Якщо коефіцієнт чутливості захистів менше 1,5, застосовують для захисту від міжфазних к. з.

диференційно-фазний високочастотний захист. Для захисту від однофазних к. з. застосовують ступінчатий спрямований захист нульової послідовності. Для захисту паралельних ліній застосовують поперечні диференціальні спрямовані захисти.

Спрацьовування захистів повинне бути заблоковане при коливаннях амплітуди і фази напруги на лінії, так звані «хитання», за допомогою спеціального реле блокування від хитань типу КРБ-12 для збереження стійкості енергосистеми. «Хитання» виникають при включенні електростанцій на паралельну роботу, включення та відключення навантажень на працюючі синхронні генератори електростанцій, у тому числі і при к. з. Стійкість енергосистеми порушується при зниженні напруги в системі до 0,6 номінального значення, при цьому захист відключає лінії споживачів 2-й і 3-й категорії.

## 10.2. Захист нульової послідовності

Схема захисту ліній нульової послідовності від однофазних к. з. на землю показана на рис. 10.1. містить фільтр струмів нульової послідовності на трансформаторах струму ТА1-ТА3 і струмове реле КА. Принцип дії схеми полягає в тому, що при дво- і трифазних к. з. сума фазних струмів  $3I_0 = I_A + I_B + I_C = 0$  дорівнює нулю і реле КА не спрацює. При однофазному к. з. на землю з'являється струм нульової послідовності  $3I > 0$  і реле КА спрацьовує.

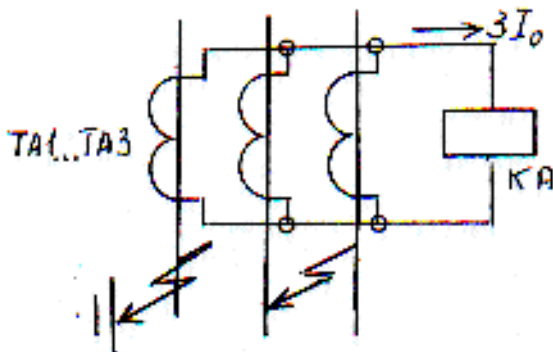


Рис. 10.1 – Схема захисту за струмом нульової послідовності

Для ліній із двостороннім живленням застосовують спрямований захист нульової послідовності (СЗНП) при необхідності побудований за ступінчатим принципом. Схему СЗНП будують на основі реле напрямку потужності типу РБМ-171 (рис.10.2). Котушки струму і напруги реле РБМ-171 підключаються відповідно до фільтра струмів і напруг нульової послідовності, тобто на суму фазних струмів і напруг.

При к. з. у точці К2 струм к. з. тече з лінії ВЛ1 у шини ПС2 і захист не працює. При к. з. у точці К1 струм к. з. тече від шин ПС2 у лінію ВЛ1 і захист спрацює. Таким чином, СЗНП спрацьовує від напрямку струму к. з. до точки к.з.

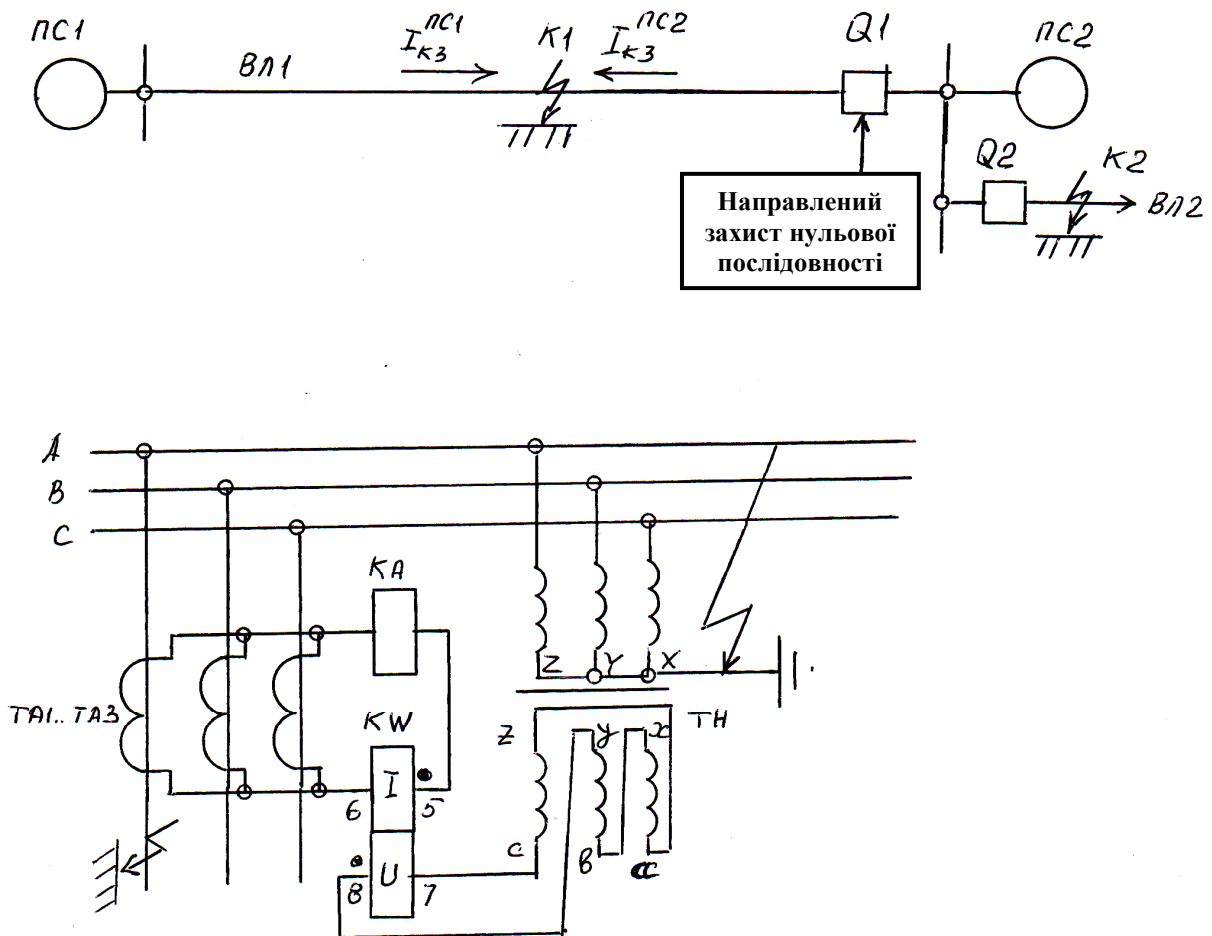


Рис. 10.2 – Схема напрямленого захисту нульової послідовності

### 10.3. Дистанційний захист ліній

Дистанційний захист (ДЗ) призначений для захисту ліній від міжфазних к. з. і входить до складу стандартної захисної панелі типу ЕПЗ-1636 для захисту ліній 110 кВ і більше.

Принцип дії ДЗ заснований на вимірі опору ділянки, тобто дистанції лінії від джерела живлення до точки к. з. У нормальному режимі опір лінії дорівнює

$$Z_{\text{ВЛ}}^H = U_H / I_H = \sqrt{(R_{\text{ВЛ}} + R_{\text{НАГР}})^2 + (X_{\text{ВЛ}} + X_{\text{НАГР}})^2}$$
 і визначається в основному опорами навантаження, підключеного до лінії. При к. з. на лінії опір навантаження дорівнює нулю, струм  $I_K$  у лінії зростає до струму к. з., а напруга  $U_K$  на шинах живильної підстанції падає. Тоді опір лінії при к. з. 
$$Z_{\text{ВЛ}}^K = U_K / I_K = \sqrt{R_{\text{ВЛ}}^2 + X_{\text{ВЛ}}^2}$$
 падає.

Таким чином, уставка  $Z_C$  спрацьовування дистанційного захисту повинна бути побудована на зменшення опору в режимі к. з. і знаходиться в діапазоні опорів лінії, тобто

$$\frac{U_K}{I_K} = Z_{B.L}^K < Z_C < Z_{B.L}^H = \frac{U_H}{I_H}. \quad (10.1)$$

З (10.1) випливає, що  $U_K < I_K Z_C$ , тобто реле контролю опору лінії можна будувати на порівнянні двох сигналів, пропорційних струму в лінії і напрузі на початку лінії.

Спрощена схема реле опору типу КРС-1 показана на рис.10.3 і містить вбудовані в конструкцію реле трансформатори струму ТА і напруги TV, що підключаються до зовнішніх вимірювальних трансформаторів струму і напруги, два випрямляча V1, V2, операційний підсилювач DA1, що працює в режимі компаратора, тобто порівнює сигнали пропорційні струму і напрузі лінії і вихідне електромагнітне реле KV напруги. Настроювання реле на уставку спрацьовування відбувається змінними резисторами R2, R3. Крокові уставки спрацьовування дорівнюють  $Z_C = 0,25; 0,5; 1,0 \text{ Ом}$ .

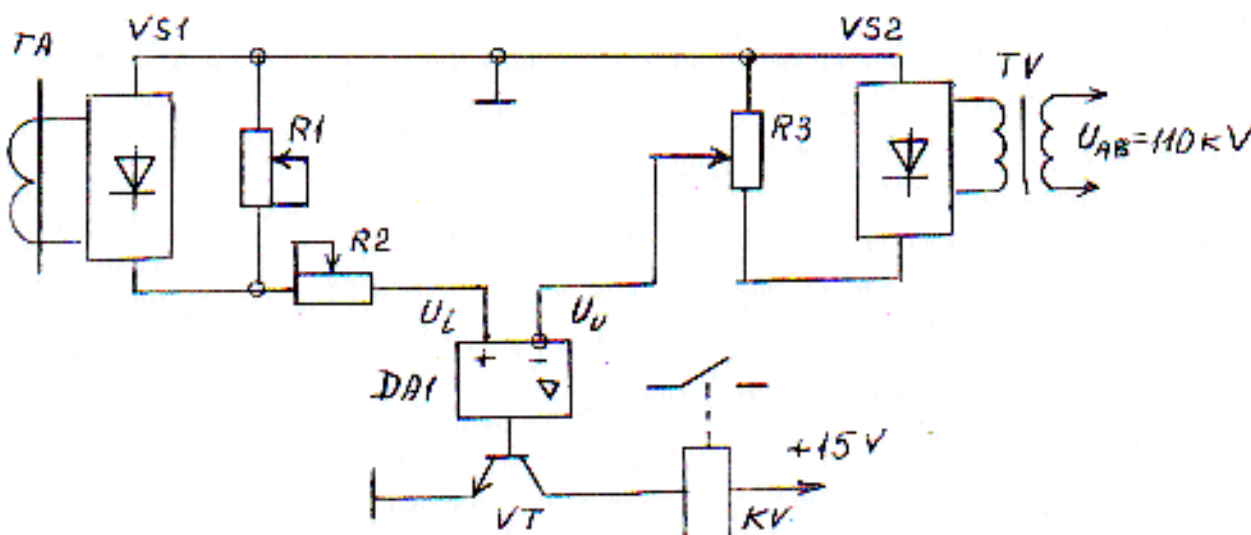


Рис. 10.3 – Спрощена схема реле опору типу КРС-1

Принцип роботи реле КРС-1 полягає в тому, що при к. з. сигнал  $U_i$ , пропорційний струму на вході реле зростає, а сигнал  $U_v$ , пропорційний напрузі лінії зменшується. При досягненні умови  $U_i > U_v$  на виході компаратора DA1 з'являється напруга +15В, транзистор VT відкривається, реле KV спрацьовує і його контакт замикає коло відключення вимикача. Для побудови дистанційного захисту використовують три реле опору типу КРС-1, на кожне з яких подають лінійні напруги і фазні струми.

Приклад розрахунку триступінчастого дистанційного захисту лінії 110 кВ на реле КРС-1 та вихідні дані для розрахунку приведені на рис.10.4.

Перший ступінь захисту, який діє без витримки часу повинен захищати лінію ВЛ1 від міжфазних к. з. уздовж лінії до її кінця, допускається її спрацьовування на шинах розподільної підстанції РП-1.

Другий ступінь захисту діє з витримкою часу при відмовленні дистанційного захисту лінії ВЛ-2 або її вимикача Q2. Уставка спрацьовування за опором повинна бути більше уставки 1-го ступеню оскільки до опору ВЛ1 додається опір лінії ВЛ2.

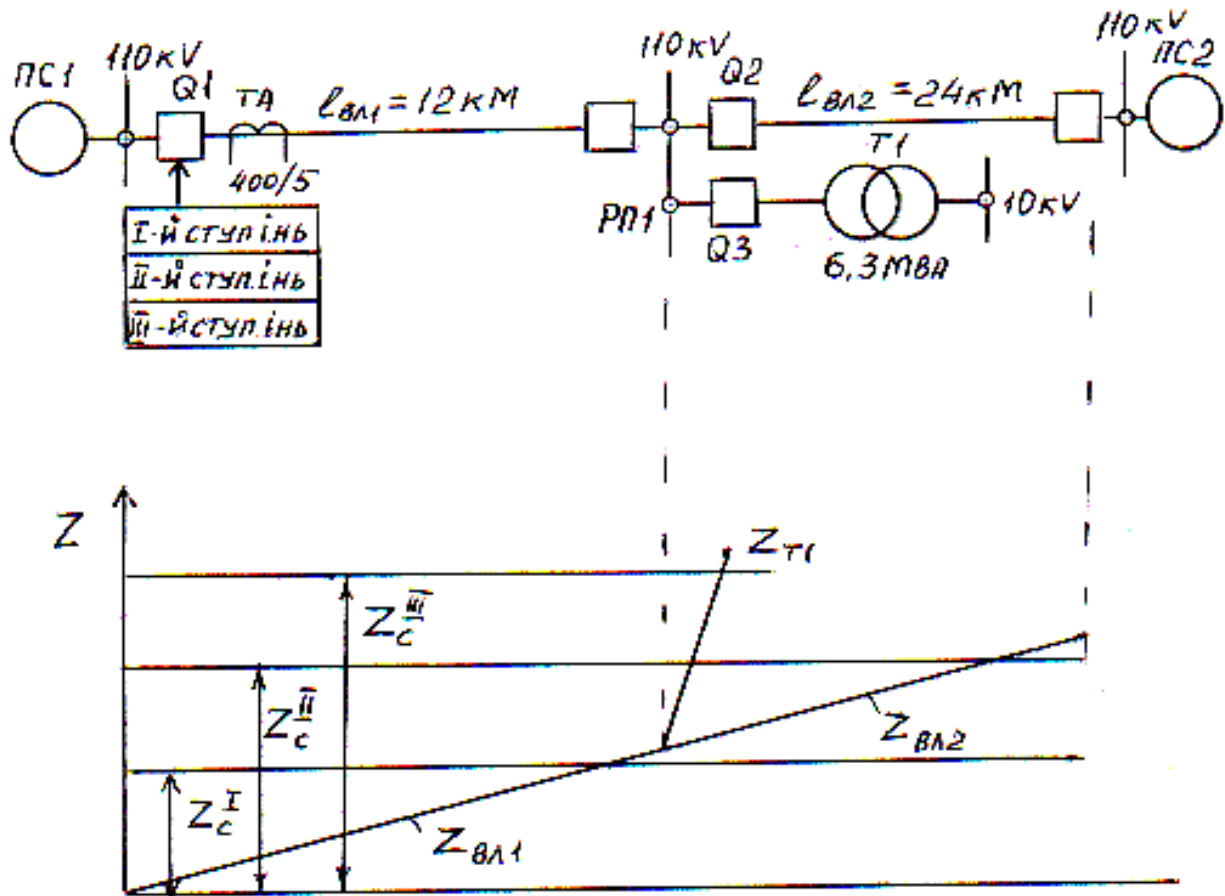


Рис. 10.4- Приклад розрахунку триступеневого дистанційного захисту

Третій ступінь захисту діє з витримкою часу при відмовленні захистів трансформатора Т1 або його вимикача. Уставка його спрацьовування більше уставки 2-го ступеню, оскільки опір трансформатора Т1 більше опору лінії ВЛ2.

Уставки спрацьовування ступеней дистанційного захисту дорівнюють

$$Z^I = 0,85Z_{ВЛ1} = 0,85\sqrt{X_{ВЛ1}^2 + R_{ВЛ1}^2} = 0,85\sqrt{\ell_{ВЛ1}^2 (x_{уд}^2 + z_{уд}^2)} = 0,85\sqrt{144(0,428^2 + 0,444^2)} = 3,9\text{ Ом}$$

$$Z^2 = 0,85(Z_{ВЛ1} + Z_{ВЛ2}) = 7,8\text{ Ом}; Z^{III} = 0,85(Z_{ВЛ1} + Z_{Т1}) = 206\text{ Ом}.$$

Визначаємо уставки спрацьовування реле опору КРС-1 для відповідних ступеней захистів з урахуванням коефіцієнтів трансформації трансформаторів струму і напруги

$$Z_{КРС-1}^I = Z_{ДС-1} \frac{K_{ТА1}}{K_{ТН1}} = 3,9 \frac{400/5}{110/0,1} = 0,28\text{ Ом}; Z_{КРС-2}^{II} = 0,56\text{ Ом}; Z_{КРС-3}^{III} = 14,9\text{ Ом}.$$

За розрахунковим значенням уставок приймаємо значення уставок, позначених на шкалі уставок реле, тобто  $Z_{KPC-1} = 0,25 \text{ Ом}$ ,  $Z_{KPC-2} = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $Z_{KPC-3} = 1 \text{ Ом}$ . Приймаємо витримки часу при спрацьовуванні ступеней захистів  $t^I = 0$ ;  $t^{II} = 0,4 \text{ сек}$ ;  $t^{III} = 0,8 \text{ сек}$ .

#### 10.4. Диференційно-фазний захист ліній

Диференційно-фазний захист (ДФЗ) застосовується в мережах складної конфігурації, у тому числі при двосторонньому живленні ліній. ДФЗ спрацьовує при усіх видах к. з. тільки на лінії, що захищається, і не спрацьовує при к. з. на суміжних лініях, тобто має високу точність зони селективності захисту.

Спрощена схема ДФЗ і діаграми, що пояснюють принцип її роботи, показані на рис. 10.5. Схема містить: Q1, Q2 — вимикачі типу ВМТ-110Б; ТА1, ТА2 — трансформатори струму; Z1, Z2 — високочастотні (1 МГц) фільтри (загороджувач); С1, С2 — розділові конденсатори,  $C = 6200 \text{ пФ}$ ;

ГВЧ1, ГВЧ2 — генератори високочастотних сигналів (ВЧ) амплітудою 100 В и частотою 1 МГц; ПВЧ1, ПВЧ2 — приймачі ВЧ сигналів; Л1, Л2 — трьохелектродні електронні лампи (тріод); КВ1, КВ2 — електромагнітні виконавчі реле.

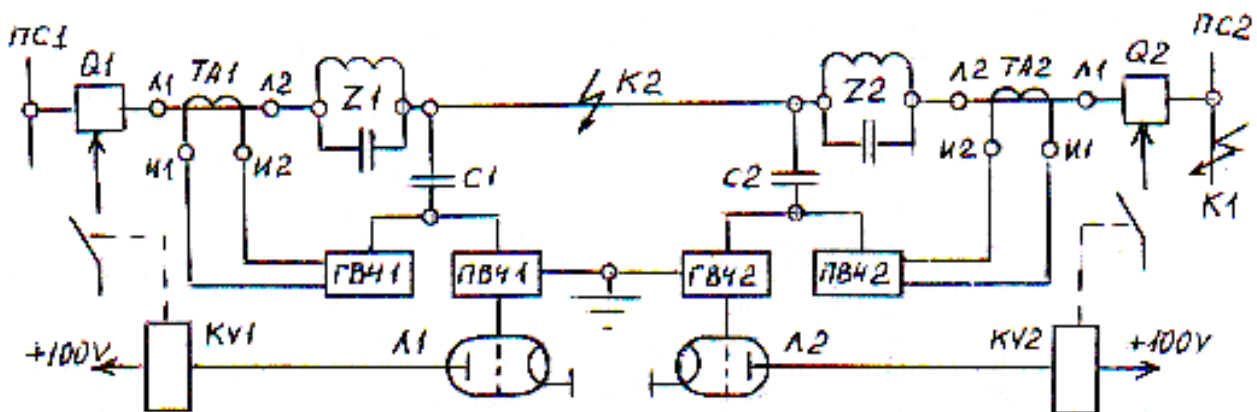


Рис. 10.5 – Схема диференціально-фазного захисту ліній

На рис. 6.6 показані часові діаграми, що пояснюють принцип дії захисту. ГВЧ1 і ГВЧ2 генерують синусоїдальну напругу частотою 1 МГц і амплітудою 100 В тільки в позитивний напівперіод струму навантаження лінії. Ці сигнали через розділові конденсатори (частоту 50 Гц не пропускають). С1 і С2 надходять у фазу В лінії і передаються в інший кінець лінії по каналу, утвореному фазним проводом і землею. На кінцях лінії установлені фільтри Z1 і Z2, опір яких для ВЧ сигналів у 100 разів більше опору конденсаторів, що запобігає поширенню ВЧ сигналів за межі лінії і їхньому загасанні, тобто зниження амплітуди при невеликій потужності ГВЧ близько 30 Вт.

Передача ВЧ сигналів у лінію від ГВЧ1 і ГВЧ2 виробляється в інтервали, коли на клемах Л1 трансформаторів струму ТА1 і ТА2 позитивна напівхвиля струму навантаження відносно клеми Л2. Звідси випливає, що коли ГВЧ1 працює, то ГВЧ2 вимкнений, тобто робота генераторів керується (маніпулюється) струмом навантаження 50 Гц, їхні сигнали в лінії зсунуті за фазою на 180 градусів.

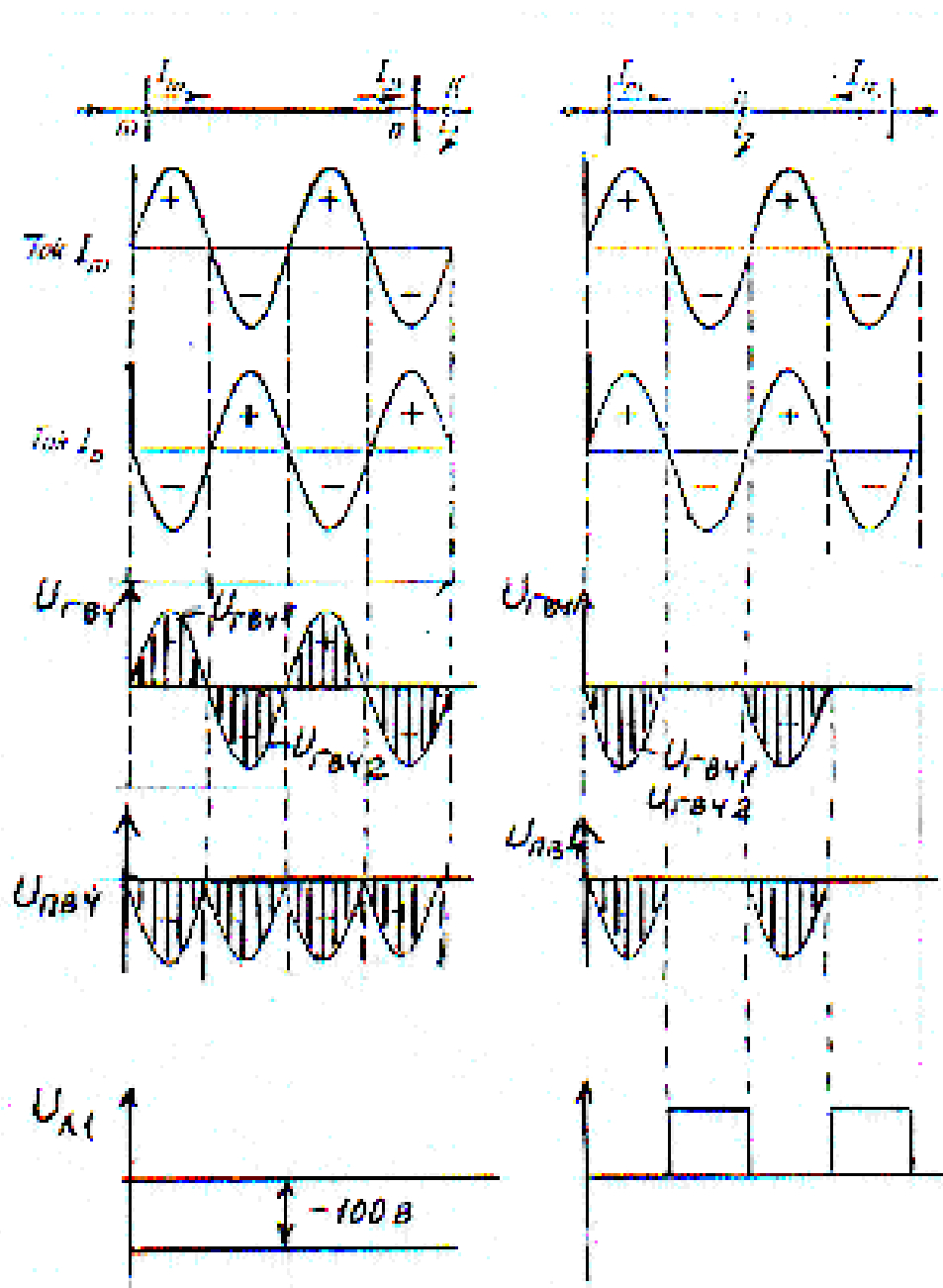


Рис. 10.6 – Часові діаграми роботи захисту

Приймачі ВЧ сигналів ПВЧ1 і ПВЧ2 улаштовані таким чином, що при наявності ВЧ сигналів у лінії на їхніх виходах напруга мінус 100 В вимикає лампи Л1 і Л2.

У нормальному режимі й у режимі зовнішнього к. з. (точка К1) на кожний із приймачів ПВЧ1 і ПВЧ2 в одну половину струму навантаження надходить сигнал від свого ГВЧ, а в іншу половину надходить сигнал від іншого ГВЧ через лінію і розділовий конденсатор. При цьому на всьому періоді на виході ПВЧ1 і ПВЧ2 сигнал мінус 100 В, лампи Л1 і Л2 закриті і реле КВ1 і КВ2 не працюють.

При внутрішньому к. з. (точка К2) струм к. з. втікає в клему Л1 ТА2 і ГВЧ2 посиляє сигнали в лінію синфазно з ГВЧ2. Це означає, що в одну напівхвилю струму к. з. у лінію сигнали не посиляються і на виходах ПВЧ1 і ПВЧ2 з'являються сигнал +100 В, відкривають лампи Л1 і Л2, спрацьовують реле КВ1 і КВ2, дають команду на відключення вимикачів Q1 і Q2.

Важливим достоїнством ДФЗ є неспрацьовування захисту при хитаннях напруги, що виключає застосування блокування від хитань, що ускладнюють схеми захисту. Це забезпечується за рахунок того, що контролюють не величини струмів, а їхні фази.

## 11. РЕЛЕЙНА АВТОМАТИКА

Релейна автоматика забезпечує надійність електропостачання і зберігає стійкість енергосистеми. Класифікація пристроїв релейної автоматики за їх призначенням наступна: АПВ — автоматичне повторне включення під напругу ліній або трансформаторів після неручного їхнього відключення; АВР — автоматичне включення резерву, тобто після зникнення напруги споживачі автоматично підключаються до іншого джерела; АЧР — автоматичне частотне розвантаження, тобто відключення споживачів 3-ї категорії при зниженні частоти напруги; ЧАПВ — частотне автоматичне повторне включення після підвищення частоти до норми.

На повітряних лініях, як релейну автоматику, застосовують автоматичне повторне включення (АПВ), яке полягає в тому, що після вимикання лінії не оперативним персоналом відбувається одноразове автоматичне повторне включення лінії, якщо лінія при цьому залишається в роботі, таке АПВ називають успішним. Використання АПВ значно підвищує надійність електропостачання і тому необхідне при живленні споживачів 1-ої категорії і рекомендоване при живленні споживачів 2-ої категорії. Спрацьовування АПВ відбувається через 1 -1,5 секунди після вимикання лінії, що зумовлено підготовкою приводу вимикачів для їх включення. Основним елементом схеми АПВ є комплектне реле типу РПВ-58, схема якого показана на рис 11.1.

Схема містить у собі реле часу КТ1 для створення витримки часу від моменту відключення вимикача до моменту подачі живлення на електромагніт включення, RC- ланцюжки (  $R=1,1$  кОм,  $C=20$  мкФ), що забезпечує однократність дії АПВ і створює витримку часу для автоматичного повернення схеми реле в початковий стан, проміжне реле КЛ1 із двома котушками, одна з



яких включається паралельно конденсаторові С і забезпечує спрацьовування реле, а друга – послідовна - забезпечує утримання якоря реле в притягнутому стані після розряду конденсатора С, резистор R1 у колі котушки для зменшення струму через неї після його спрацьовування, що забезпечує термічну стійкість котушки, резистор R3= 510 Ом, через який відбувається розряд конденсатора С у випадку заборони АПВ при ручному вимиканні вимикача оперативним персоналом за допомогою ключа керування SA, проміжні реле KQT, KQS, що фіксує положення вимикача 10 кВ, що контролюють цілісність електричних кіл відповідно включення і вимикання.

Схема АПВ працює наступним чином. Після вимикання вимикача 10 кВ не від ключа виникає невідповідність між положенням ключа керування SA (положення “включений”) і положенням вимикача 10 кВ (положення “виключене”), при якому замикається блок-контакт, що розмикає, у колі живлення котушки контактора КМ. Котушка проміжного реле KQS знеструмлюється через розмикання блоку-контакту вимикача 10 кВ, а котушка проміжного реле KQT одержує живлення.

Контакт KQT (3-5) замикається і котушка реле часу КТ1 одержує живлення через контакт 1-3 ключа керування SA. З витримкою часу 1-1,5 секунди змикається його контакт КТ1.2 і підключає конденсатор С паралельно котушці проміжного реле KL1.

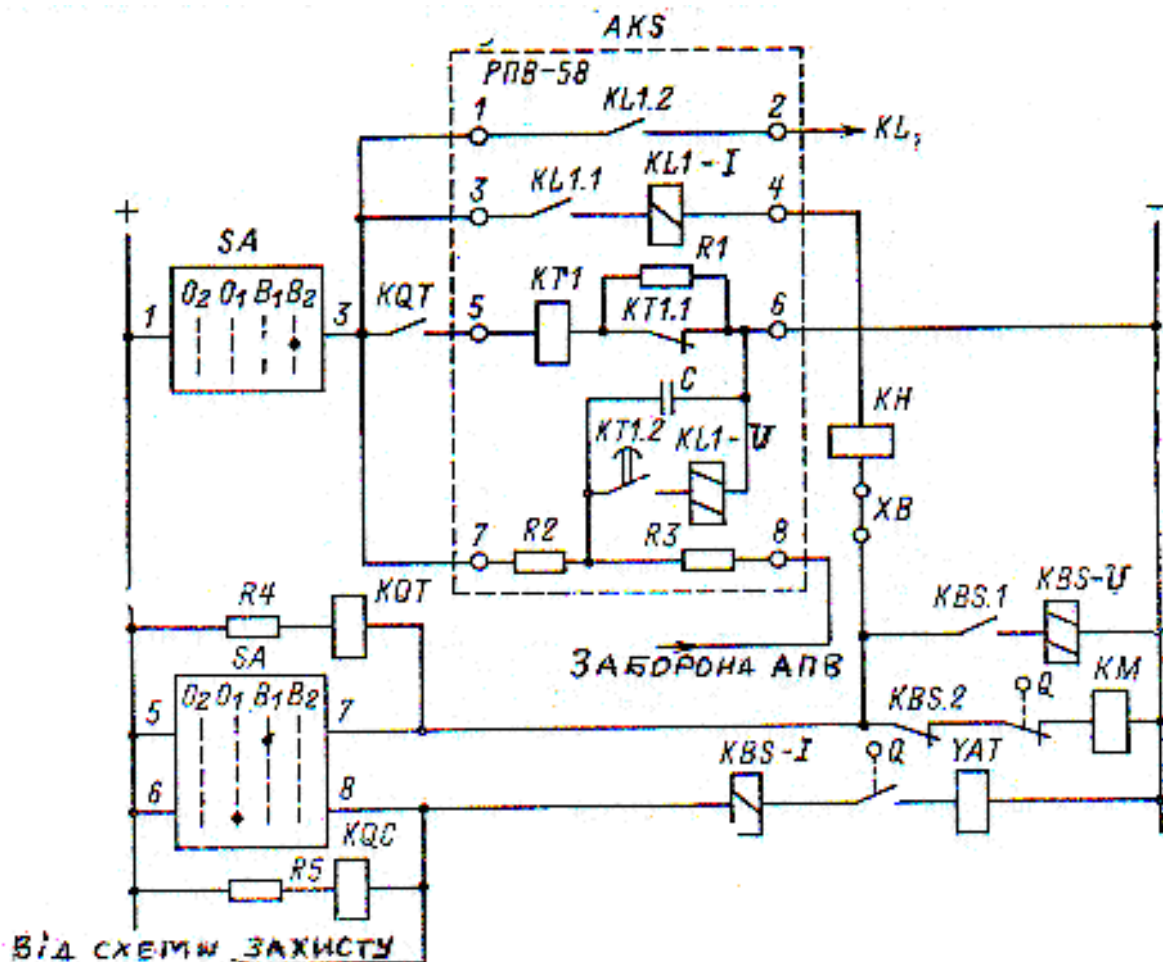


Рис. 11.1- Схема підключення реле повторного вмикання типу РПВ-58

Його контакт KL1.1 (3-4) змикається в колі котушки контактора КМ і послідовної котушки проміжного реле KL1 для утримання реле після розряду конденсатора С. У випадку успішного АПВ, тобто лінія залишається включеною, контакт проміжного реле KQT розмикає пускове коло АПВ. Конденсатор С дешунтується при розмиканні контакту КТ1.2 і починає заряджатися через резистор R2 протягом 15-20 секунд до готовності для нового спрацьовування реле РПВ-58. При неуспішному АПВ, тобто, повторному вимиканні вимикача 10 кВ релейним захистом реле РПВ-58 знову запускається і контакт КТ1.2 знову з витримкою часу 1-1,5 секунди підключає конденсатор С паралельно котушці проміжного реле KL1. Але проміжне реле KL1 не спрацює, тому що конденсатор С не встигне зарядитися до напруги спрацьовування котушки проміжного реле KL1, чим і забезпечується однократність спрацьовування схеми АПВ.

При оперативному вимиканні лінії ключем керування SA схема АПВ не спрацює, тому що розмикається його контакт 1-3. Якщо при оперативному включенні лінії ключем керування SA лінія включається на стійке коротке замикання, то АПВ не спрацює, тому що включення лінії відбувається двома контактами: один ковзний (імпульсний), інший стаціонарний. У процесі включення ковзний (імпульсний) контакт розряджає конденсатор С через резистор R3 і АПВ не спрацює. Багаторазове АПВ на стійке коротке замикання можливе у випадку зварювання контактів проміжного реле KL1. Цього не допускає спеціальне проміжне реле KBS, що складається з двох котушок: напруги (паралельна) і струмову (послідовну). Якщо контакт проміжного реле KL1 постійно замкнутий або постійно замкнутий ковзний (імпульсний) контакт 5-7 ключа керування SA, то при спрацьовуванні релейного захисту у випадку короткого замикання струмова котушка проміжного реле KBS спрацює і його контакт поставить котушку напруги проміжного реле KBS на саможивлення. При цьому контакт, що розмикає, реле KBS розмикає коло живлення котушки контактора КМ, що включає коло живлення котушки електромагніта включення YAC. Для повторного включення вимикача необхідно ключ керування SA повернути в положення “виключене”, при цьому розмикається коло живлення котушки напруги проміжного реле KBS і готується коло для успішного включення вимикача.

Автоматичне частотне розвантаження (АЧР) і автоматичне повторне включення після спрацьовування АЧР, що називають частотне автоматичне повторне включення (ЧАПВ) застосовують для підвищення надійності роботи енергосистеми шляхом відключення частини споживачів 3-ої категорії за надійністю електропостачання при дефіциті активної потужності в енергосистемі. При дефіциті активної потужності знижується значення частоти струму. Небезпечним значенням частоти струму, при якому порушується паралельна робота генераторів електростанцій і відбувається значне зниження напруги є величина 47 Гц.

При організації автоматичного частотного розвантаження (АЧР) складається черга споживачів на відключення залежно від їхньої категорії за надійністю електропостачання. Перша черга споживачів відключається при

частоті 48 Гц, друга черга споживачів відключається при частоті 47,5 Гц, третя черга споживачів відключається при частоті 47 Гц.

Для прискорення відновлення електропостачання споживачів відключених АЧР застосовують частотне автоматичне повторне включення (ЧАПВ), що відпрацьовує після відновлення нормального рівня частоти і дає команду на підключення електропостачання споживачів через 10-20 секунд. Схемна реалізація АЧР і ЧАПВ має багато варіантів, один із яких показаний на рис. 11.2 та 11.3. При цьому використовують реле частоти з різним принципом дії. Для побудови АЧР із великим числом черг використовують декілька реле частоти, оскільки число уставок ступенів одного реле частоти обмежене. Для розширення можливостей одного реле частоти використовують схеми переключення уставок спрацьовування реле. Розглянемо одну з таких схем. Схема АЧР передбачає використання одного реле частоти КF, уставка спрацьовування реле змінюється на меншу частоту при зниженні напруги мережі. При зниженні частоти в мережі реле частоти КF спрацьовує, коли частота досягає значення першої уставки спрацьовування реле. Реле частоти КF запускає реле часу КТ, миттєвий контакт реле часу КТ подає напругу на котушку проміжного реле КЛ1 і воно спрацьовує. Своїм контактом проміжне реле КЛ1 включає проміжне реле КЛ2, що стає на саможивлення за допомогою контакту КЛ2.1. Контакти реле КЛ2.2 виключають першу чергу споживачів, а контакти реле КЛ2.3 змінюють уставку спрацьовування реле на меншу частоту, включаючи резистор у коло живлення котушки реле. При цьому усі реле повертаються в початковий стан. При подальшому зниженні частоти в мережі реле частоти КF спрацьовує на другій уставці і знову спрацюють вищезгадані реле.

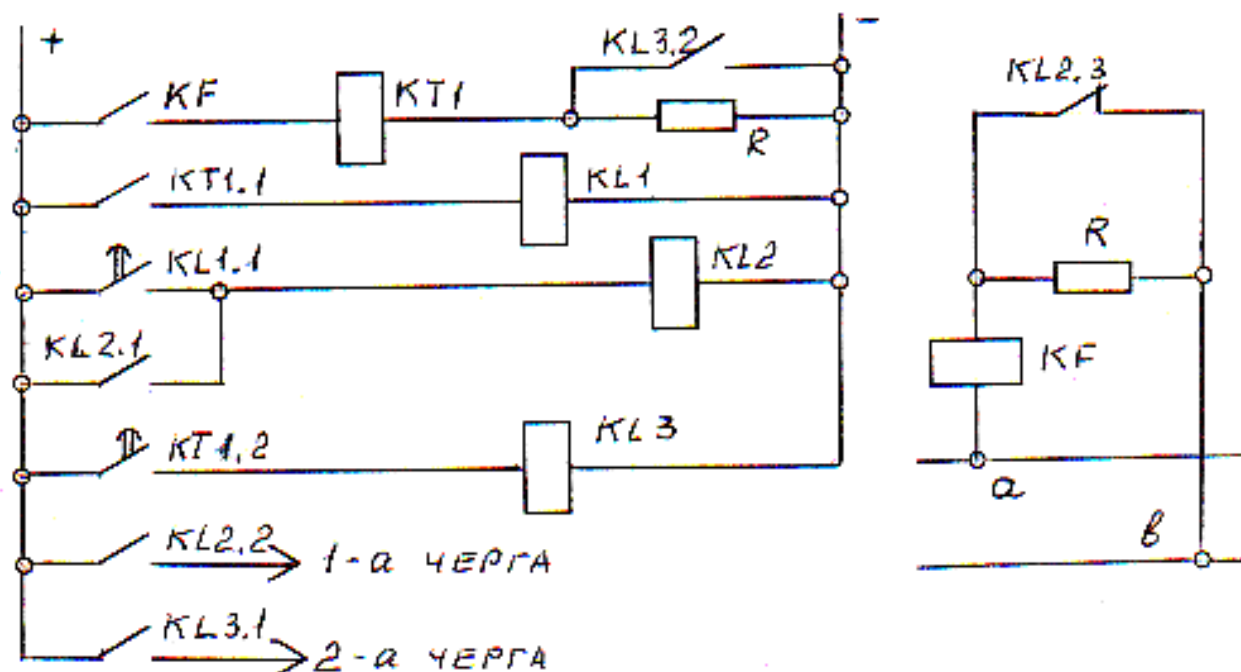


Рис. 11.2 - Схема автоматичного частотного розвантаження

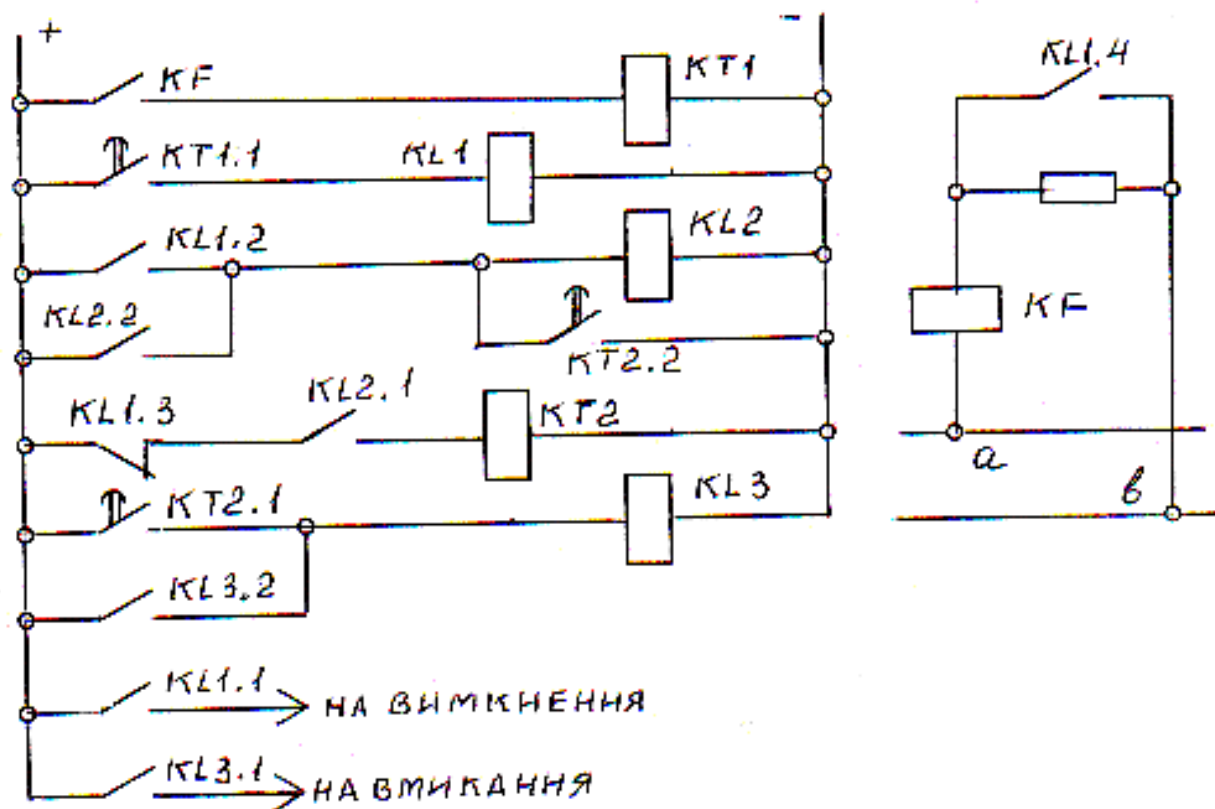


Рис. 11.3 – Схема частотного автоматичного повторного вмикання

Після замикання контактів реле часу  $KT2.1$  з найбільшою витримкою часу спрацьовує реле  $KL3$  і своїми контактами відключає другу чергу споживачів.

Як відзначалося вище, важливо не тільки відключити споживачів при зниженні частоти, а і відновити їхнє живлення при поверненні частоти до нормального рівня. Для цього використовують частотне автоматичне повторне включення (ЧАПВ), що спрацьовує після відновлення нормального рівня частоти і дає команду на підключення електропостачання споживачів через 10-20 секунд. Схемна реалізація АЧР і ЧАПВ має багато варіантів один із яких показаний на рис. 11.3. При цьому використовують реле частоти з різним принципом дії. Схема передбачає роботу в одну чергу. Спрацьовування реле частоти  $KF$  при заданому рівні зниження частоти забезпечує включення реле часу  $KT1$ , що у свою чергу запусить своїми контактами  $KT1.1$  проміжне реле  $KL1$  і відімкне споживачів. Реле  $KL1$  виконує ряд допоміжних операцій: контакти  $KL1.2$  забезпечують спрацьовування реле  $KL2$ , що стає на саможивлення через контакти  $KL2.2$ ; контакти  $KL1.2$  розмикають коло реле часу  $KT2$ , підготовляючи його до подальшої роботи; контакти  $KL1.4$  змінюють уставку спрацьовування реле частоти  $KF$  убік її підвищення.

При зростанні частоти реле  $KF$ , реле часу  $KT1$  і проміжне реле  $KL1$  повертаються в початковий стан, оскільки контакти реле  $KF$  розімкнуться. При цьому збирається коло живлення реле часу  $KT2$ , тому що контакти  $KL2.1$  ще будуть замкнуті. Реле часу відраховує витримку часу і своїх контактів  $KT2.1$

включає проміжне реле KL3 і дає команду на включення споживачів під напругу. Контакти реле часу КТ2.2 з максимальною витримкою часу шунтують котушку реле KL2 і його якір відпадає. Розмикається коло живлення котушки реле часу КТ2 і схема повертається в початковий стан.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила устройства электроустановок/Минэнерго СССР/. – 6 изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. – М.: Высш. шк., 1991.
3. Шабад М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – Л.: Энергия, 1972.
4. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976.
5. Релейний захист і автоматика в системах електропостачання./ Говоров П.П. та ін. – К. 1996.

## Навчальне видання

Конспект лекцій з дисципліни «Релейний захист та автоматика» (для студентів 4 курсу денної і 4,5 курсів заочної форм навчання з спеціальностей 6.090603 - “Електротехнічні системи електроспоживання” і 6.050701 - «Електротехніка та електротехнології»)

Укладач: Віктор Миколайович Ковальов

Редактор: М.З. Аляб`єв

Коректор: З.І. Зайцева

План 2008, поз. 1Л

Підп. до друку 16.01.2008 р.	Формат 60x84 1/16	Папір офісний
Друк на ризографі	Умовн.-друк. арк.6,5	Обл.- вид. арк.7,0
Замовл. №	Тираж 100 прим.	

61002, Харків, ХНАМГ, вул. Революції,12

Сектор оперативної поліграфії ІОЦ ХНАМГ

61002, Харків, вул. Революції,12.